

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2001年3月22日 (22.03.2001)

PCT

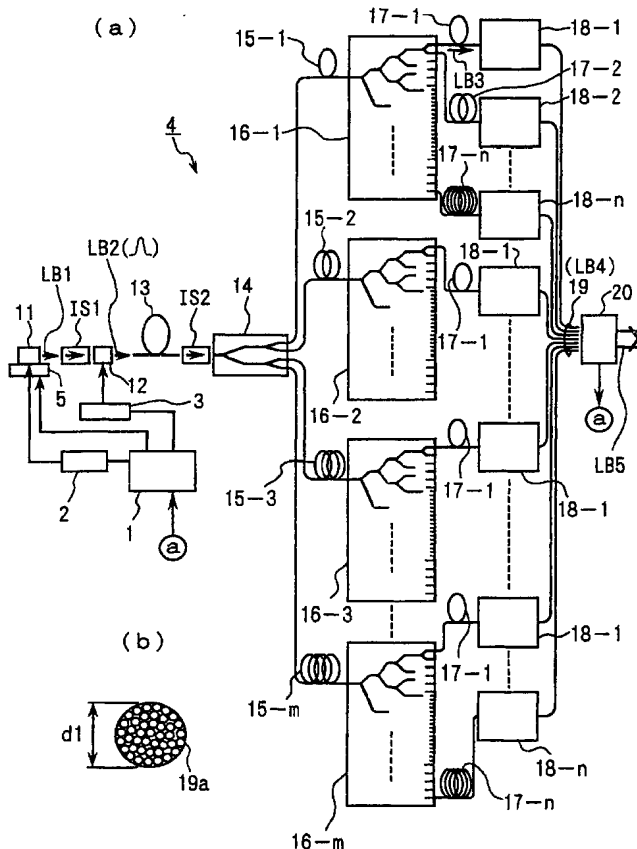
(10) 国際公開番号  
WO 01/20398 A1

- (51) 国際特許分類: G02F 1/37, G03F 7/20, H01L 21/027, H01S 3/06, 3/00 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 富士ビル Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP00/06132 (72) 発明者; および
- (22) 国際出願日: 2000年9月8日 (08.09.2000) (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 大槻朋子 (OHT-SUKI, Tomoko) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 富士ビル 株式会社 ニコン 知的財産部内 Tokyo (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語 (74) 代理人: 大森 聡 (OMORI, Satoshi); 〒214-0014 神奈川県川崎市多摩区登戸2075番2-501 大森特許事務所 Kanagawa (JP).
- (26) 国際公開の言語: 日本語 (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KH, KR, KZ, LA, LB, LC, LG, LI, LU, LV, LY, MA, MG, MK, MN, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NL, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PK, PL, PT, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SI, SK, SL, SM, SN, SR, ST, SV, SW, SZ, TC, TD, TF, TG, TH, TJ, TK, TL, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VE, VG, VI, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (30) 優先権データ: 特願平11/258132 1999年9月10日 (10.09.1999) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社 ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8331

[続葉有]

(54) Title: EXPOSURE DEVICE WITH LASER DEVICE

(54) 発明の名称: レーザ装置を備えた露光装置



(57) Abstract: An exposure device has a laser device that is small, easy to maintain, and capable of producing an output that is unlikely to be affected by optical surges occurring in the beginning of operation. A single-wavelength laser oscillator (11) supplies a laser beam (LB1) to a fiber optic amplifier (13) through an optical modulator (12). The amplified laser beam is split by splitters (14, 16-1 to 16-m), amplified by optical amplifier units (18-1 to 18-n) and supplied through a fiber bundle (19) to a wavelength converter (20), which in turn converts the split beams into ultraviolet laser radiation (LB5) for use as exposure light. The optical modulator (12) outputs light pulses during the generation of ultraviolet light. The optical modulator (12) also produces laser radiation during the absence of ultraviolet light, but the laser radiation has substantially the same average output and a considerably low peak compared with that during the generation of ultraviolet light.

[続葉有]



IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

LU, MC, NL, PT, SE), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

小型でメンテナンスが容易であり、レーザ光の照射を開始する際に光サージによって出力が変動しないレーザ装置を備えた露光装置である。単一波長発振レーザ (11) からのレーザ光 (LB1) を光変調素子 (12) を介して光ファイバー増幅器 (13) に供給し、ここで増幅されたレーザ光をスプリッタ (14, 16-1~16-m) 等を介して分岐して、光増幅ユニット (18-1~18-n) を用いて増幅して光ファイバー・バンドル (19) に束ねた後、波長変換部 (20) によって紫外光のレーザ光 (LB5) に変換し、その紫外光を露光光として用いる。紫外光を出力する期間では、光変調素子 (12) からパルス光を出力し、紫外光を出力しない期間においても、光変調素子 (12) から紫外光を出力する期間と平均出力がほぼ同じでピークレベルがかなり低いレーザ光を出力する。

## 明 細 書

レーザ装置を備えた露光装置

## 5 技術分野

本発明は、紫外光を発生するレーザ装置を備えた露光装置に関し、特に半導体素子、撮像素子（ＣＣＤなど）、液晶表示素子、プラズマディスプレイ素子、及び薄膜磁気ヘッドなどのマイクロデバイスを製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用する露光装置に使用して好適なものである。

## 背景技術

例えば半導体集積回路を製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用する露光装置は、マスクとしてのレチクル（フォトマスク）上に精密に描かれた回路パターンを、基板としてのフォトレジストを塗布したウエハ上に光学的に縮小して投影露光する。この露光時におけるウエハ上での最小パターン寸法（解像度）を小さくするのに最も単純かつ有効な方法の一つは、露光光の波長（露光波長）を短くすることである。ここで露光光の短波長化の実現と合わせて、露光光源を構成する上で備えるべきいくつかの条件につき説明する。

第１に、例えば数ワットの光出力が求められる。これは集積回路パターンの露光、転写に要する時間を短くして、スループットを高めるために必要である。

第２に、露光光が波長３００ｎｍ以下の紫外光の場合には、投影光学系の屈折部材（レンズ）として使用できる光学材料が限られ、色収差の補正が難しくなる。このため露光光の単色性が必要であり、露光

光のスペクトル線幅は 1 p m 程度以下にすることが求められる。

第 3 に、このスペクトル線幅の狭帯化に伴い時間的コヒーレンス（可干渉性）が高くなるため、狭いスペクトル線幅（波長幅）の光をそのまま照射すると、スペックルと呼ばれる不要な干渉パターンが生ずる。従  
5 ってこのスペックルの発生を抑制するために、露光光源では空間的コヒーレンスを低下させる必要がある。

これらの条件を満たす従来の短波長の光源の一つは、レーザの発振波長自身が短波長であるエキシマレーザを用いた光源であり、もう一つは赤外又は可視域のレーザの高調波発生を利用した光源である。

10 このうち、前者の短波長光源としては、K r F エキシマレーザ（波長 2 4 8 n m）が使用されており、現在では更に短波長の A r F エキシマレーザ（波長 1 9 3 n m）を使用する露光装置の開発が進められている。更に、エキシマレーザの仲間である F<sub>2</sub> レーザ（波長 1 5 7 n m）の使用も提案されている。しかし、これらのエキシマレーザは大型であること、  
15 発振周波数が現状では数 k H z 程度であるため、単位時間当たりの照射エネルギーを高めるためには 1 パルス当たりのエネルギーを大きくする必要があり、このためにいわゆるコンパクション等によって光学部品の透過率変動等が生じやすいこと、メンテナンスが煩雑でかつ費用が高額となることなどの種々の問題があった。

20 また、後者の方法としては、非線形光学結晶の 2 次の非線形光学効果を利用して、長波長の光（赤外光、可視光）をより短波長の紫外光に変換する方法がある。例えば文献「"Longitudinally diode pumped continuous wave 3.5W green laser", L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota; Optics Letters, vol. 19, p189 (1994) 」では、半導体レー  
25 ザ光で励起された固体レーザからの光を波長変換するレーザ光源が開示されている。この従来例では、N d : Y A G レーザの発する 1 0 6 4 n

mのレーザ光を、非線形光学結晶を用いて波長変換し、4倍高調波の266nmの光を発生させる方法が記載されている。なお、固体レーザとは、レーザ媒質が固体であるレーザの総称である。

また、例えば特開平8-334803号公報及び対応する米国特許第5,838,709号では、半導体レーザを備えたレーザ光発生部と、このレーザ光発生部からの光を非線形光学結晶により紫外光に波長変換する波長変換部とから構成されるレーザ要素を複数個、マトリックス状（例えば $10 \times 10$ ）に束ねたアレイレーザが提案されている。

このような構成の従来のアレイレーザでは、個々のレーザ要素の光出力を低く抑えつつ、装置全体の光出力を高出力とすることができ、各非線形光学結晶への負担を軽減することができる。しかし、一方では、個々のレーザ要素が独立していることから、露光装置への適用を考慮した場合には、レーザ要素全体でその発振スペクトルを全幅で1nm程度以下まで一致させる必要がある。

このため、例えば、各レーザ要素に自律的に同一波長の単一縦モード発振をさせるためには、各々のレーザ要素の共振器長を調整し、あるいは共振器中に波長選択素子を挿入したりする必要があった。しかし、これらの方法は、その調整が微妙であること、構成するレーザ要素が多くなればなるほど全体を同一波長で発振させるのに複雑な構成が必要になること等の問題があった。

一方、これら複数のレーザを能動的に単一波長化する方法としてインジェクションシード法がよく知られている（例えば、「Walter Koechner; Solid-state Laser Engineering, 3rd Edition, Springer Series in Optical Science, Vol. 1, Springer-Verlag, ISBN 0-387-53756-2, p. 246-249」参照）。これは、発振スペクトル線幅の狭い単一のレーザ光源からの光を複数のレーザ要素に分岐し、このレーザ光を誘導波とし

て用いることにより、各レーザ要素の発振波長を同調させ、かつスペクトル線幅を狭帯域化するという方法である。しかし、この方法では、シード光を各レーザ要素に分岐する光学系や、発振波長の同調制御部を必要とするため構造が複雑になるという問題があった。

5 更に、このようなアレイレーザは、従来のエキシマレーザに比べて装置全体を格段に小さくすることが可能だが、それでもアレイ全体の出力ビーム径を数 cm 以下におさえるパッケージングは困難であった。また、このように構成されたアレイレーザでは、各アレイごとに波長変換部が必要となるため高価となること、アレイを構成するレーザ要素の一部に  
10 アライメントずれが生じた場合や構成する光学素子に損傷が発生した場合に、このレーザ要素の調整をするためには、一度アレイ全体を分解してこのレーザ要素を取り出し、調整した上で再度アレイを組み立て直す必要があること、などの課題があった。

また、そのような光源を露光装置に用いた場合には、ウエハ上の各ショット領域に順次露光を行う際に露光光としての紫外光の照射（オン）  
15 と照射停止（オフ）とを繰り返す必要があるが、例えば露光光の照射を開始した直後等にも、露光光の出力（連続光では照度、パルス光の場合にはパルスエネルギー）の変動が少ないことが望ましい。

本発明は斯かる点に鑑み、装置を小型化でき、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を備えた露光装置を提供することを第 1 の目的とする。  
20

更に本発明は、レーザ光の外部への照射（オン）を開始した直後にも目標とする出力が得られるレーザ装置を備えた露光装置を提供することを第 2 の目的とする。

更に本発明は、発振周波数を高くして、かつ空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭く  
25 できるレーザ装置を備えた露光装置を提供することを第 3 の目的とする。

更に本発明は、そのような露光装置を用いた露光方法、及びデバイスの製造方法、並びにそのような露光装置の製造方法を提供することをも目的とする。

## 5 発明の開示

本発明による第1の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第1物体（163）のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体（166）を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（11）と、このレーザ光発生部から発生されるレーザ光の変調を行う光変調部（12）と、この光変調部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器（22, 25）を有する光増幅部（18-1～18-n）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶（502～504）を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（20）とを備え、その光変調部は、その紫外光を出力する期間中はそのレーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調してその光増幅部に供給し、その紫外光を出力しない期間中にもその紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲でその光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給するものである。

また、本発明の第2の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第1物体（163）を照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体（166）を露光する装置であって、そのレーザ装置は、単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（11）と、そのレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部（22, 25）と、その増幅されたレーザ光を紫外光に波長変換する波長変換部（20）とを備え、その紫外光を出力する期間と異なる条件でその紫外光を出力しない期間にも

その光増幅部に光を供給する光供給部（１２）を備えたものである。

これらの本発明の露光装置によれば、そのレーザ装置のレーザ光発生部としては、例えば発振波長が制御されたＤＦＢ（Distributed feedback）半導体レーザ、又はファイバーレーザ等の小型で発振スペクトルの狭い光源を使用することができる。そして、そのレーザ光発生部からの単一波長のレーザ光を一例として光変調部（又は光供給部）において光ファイバー増幅器で十分な増幅利得が得られるような高い周波数でパルス変調し、このパルス変調後のレーザ光を光ファイバー増幅器で増幅した後、非線形光学結晶で紫外光に変換することによって、高出力で単一波長の狭いスペクトル幅の紫外光を得ることができる。従って、小型でかつメンテナンスの容易なレーザ装置を備えた露光装置を提供できる。

この場合、光ファイバー増幅器としては、例えばエルビウム（Er）・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA）、イッテルビウム（Yb）・ドープ・光ファイバー増幅器（YDFA）、プラセオジウム（Pr）・ドープ・光ファイバー増幅器（PDFA）、又はツリウム（Tm）・ドープ・光ファイバー増幅器（TDFA）等を使用することができる。しかしながら、最終的に得られる紫外光を照射停止（オフ）から照射（オン）に切り換えるために、単にその光変調部から出力されるパルス列をオフからオンに切り換えると、光ファイバー増幅器中に貯えられていた光エネルギーが瞬時に出力されるため、光ファイバー増幅器からオンの直後に出力されるパルス光が、定常状態で増幅されるパルス列に比べて大きくなる現象である「光サージ」が生じる。これに伴い波長変換した紫外光の出力も目標値に対して変動する。

そのような光サージの影響を低減するために、本発明ではオフの期間中にもその紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲でその光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給する。これによって、紫外光の出力が安



定する。

そのように紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲でその光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給するために、第1の方法として、オンの期間（紫外光を出力する期間）では、所望の強度のパルス列を所望のタイミングで光増幅部に出力し、オフの期間（紫外光を出力しない期間）では、小さいピークレベルでほぼ一定強度の連続光、又は小さいピークレベルで1周期に対するハイレベル“1”の割合（デューティ比）が100%に近いパルス列を光増幅部に出力する。更に、その光増幅部に供給される光をオンの期間のピークレベルに対してオフの期間のピークレベルを1/10以下として、オンの期間にその光増幅部から出力される光の平均レベルと、オフの期間にその光増幅部から出力される光の平均レベルとを実質的に等しくすることが望ましい。

この場合、波長変換部での変換効率は、二次高調波の場合には入力光のピーク強度の二乗、和周波発生の場合には2つの入力光のピーク強度の積に比例する。露光装置用の紫外光発生のためには、通常は8倍波や10倍波発生 of 波長変換を行うため、最終段の波長変換後の紫外光の出力強度は入射する光（基本波）の強度のほぼ8乗から10乗に比例することになり、オフ状態での光増幅部の出力が、紫外光に変換される効率はほぼ零であり、紫外光の出力はほぼ零となる。従って、本方法によれば、光サージの影響が軽減されると共に、紫外光の出力強度はオンの期間で目標値となり、オフの期間ではほぼ零となる状態が実現される。

なお、光変調部からのオフ状態での出力強度は、出力光量制御機構を用いて更に高精度に制御することも可能である。

次に第2の方法として、そのレーザ光発生部（基準光源）（11）の他にそのレーザ光発生部から発生するレーザ光（波長 $\lambda_1$ とする）とは波長の異なる補助光（波長 $\lambda_2$ とする）を発生する補助光源（51）を

備え、オフの期間中にはその光増幅部にその補助光を供給する。この場合、その補助光の波長 $\lambda_2$ は、その波長変換部で波長変換できる許容波長範囲外の波長であり、且つ光ファイバー増幅器の利得幅内の波長であることが望ましい。これによって、最終的に出力される紫外光に影響を与  
5 えることなく、その光ファイバー増幅器の光サージを抑制できる。

また、その補助光をそのレーザ光に合成するための波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 部材 (52) の設置位置は、変調装置 (12) の入力部であっても出力部であってもよい。WDM部材を変調装置の入力部に設置する場合には、その基準光源としてのレー  
10 ザ光発生部は、最終的に出力される紫外光と同位相で、即ち紫外光がオンの間はオンになり、オフの間はオフになるようにスイッチングを行う。また、補助光源は、紫外光と逆位相で、即ちその紫外光がオンの間はオフになり、紫外光がオフの間はオンになるタイミングでスイッチングを行う。そして、変調装置では、紫外光のオン/オフによらずに常時パルス出力を行うことも可能であり、あるいは紫外光のオン期間ではパルス  
15 出力を行い、紫外光のオフ期間では低いピークレベルの一定レベルの出力、又は高いデューティ比のパルス出力を行うことも可能である。これらの中で、紫外光がオフの状態、波長 $\lambda_2$ の光のみが光増幅部に出力される制御形態を選べばよい。また、WDM部材 (52) を変調装置  
20 (12) の出力部に設置する場合には、紫外光がオフの状態、その補助光源からピークレベルの低い光を供給すればよい。

次に、第3の方法として、そのレーザ光発生部 (基準光源) (11) の他にそのレーザ光発生部から発生するレーザ光とは偏光状態の異なる補助光を発生する補助光源 (54) を備え、オフの期間中にはその光増  
25 幅部にその補助光を供給する。この場合、そのレーザ発生部からのレーザ光の偏光状態は、その波長変換部での紫外光への変換効率が最大にな

る状態（例えば所定方向への直線偏光）として、その補助光の偏光状態はその波長変換部での紫外光への変換効率が最低になる状態（例えば偏光方向が直交する偏光光）とすることが望ましい。これによって、紫外光がオフの状態では、光ファイバー増幅器には補助光が供給されてその後の光サージが抑制されると共に、波長変換部での変換効率はほとんど零であり、紫外光出力はほぼ零になる。

この方法においても、その補助光をそのレーザ光に合成するための偏波合成部材（５５）の設置位置は、上記の第２の方法と同様に変調装置（１２）の入力部であっても出力部であってもよく、その補助光のスイッチングのタイミングも上記の第２の方法と同様でよい。これらの中で、紫外光がオフの状態、その補助光のみが光増幅部に供給される制御形態を選べばよい。

これらの各露光装置のレーザ装置においては、そのレーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐部（１４，１６－１～１６－ $m$ ）を更に備え、その光増幅部（１８－１～１８－ $n$ ）はその複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けられると共に、その波長変換部は、その複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束をまとめて波長変換することが望ましい。このように光分岐部で分岐したレーザ光に順次所定の光路長差を付与することで、最終的に束ねられるレーザ光の空間的コヒーレンスが低減できる。また、各レーザ光は共通のレーザ光発生部から発生しているため、最終的に得られる紫外光のスペクトル線幅は狭くなっている。

更に、そのレーザ光は光変調部によって例えば１００kHz程度の高い周波数で容易に変調することができ、各パルス光は更に例えば１００個程度の遅延したパルス光の集合体である。従って、エキシマレーザ光（周波数は数kHz程度）を使用する場合に比べて、同じ照度を得るた

めにはパルスエネルギーを  $1/1000 \sim 1/10000$  程度にできるため、露光光源として用いた場合に、コンパクション等による光学部材の透過率変動が殆ど無くなり、安定にかつ高精度に露光を行うことができる。

5 次、本発明の波長変換部の構成については、複数の非線形光学結晶の2次高調波発生（SHG）及び和周波発生（SFG）の組み合わせによって、基本波に対して任意の整数倍の周波数（波長は整数分の1）の高調波よりなる紫外光を容易に出力することができる。

10 そして、例えばレーザ光発生部で波長が  $1.5 \mu\text{m}$ 、特に  $1.544 \sim 1.552 \mu\text{m}$  に限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の8倍高調波の発生を行う構成によって、ArFエキシマレーザと実質的に同一波長の  $193 \sim 194 \text{ nm}$  の紫外光が得られる。また、レーザ光発生部として波長が  $1.5 \mu\text{m}$  付近、特に  $1.57 \sim 1.58 \mu\text{m}$  に限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の10倍高調波の発生を行う構成によって、 $\text{F}_2$  レーザと実質的に同一波長の  $157 \sim 158 \text{ nm}$  の紫外光が得られる。

15 そして、本発明の露光装置は、更に、そのレーザ装置からの紫外光をマスク（163）に照射する照明系（162）と、そのマスクのパターンの像を基板（166）上に投影する投影光学系（165）とを有し、20 そのマスクのパターンを通過した紫外光でその基板を露光するものである。本発明のレーザ装置の使用によって、露光装置全体を小型化でき、かつメンテナンスが容易になる。

25 また、本発明の第1の露光方法は、そのレーザ装置からの紫外光がその露光装置の例えばTTR（スルー・ザ・レチクル）方式のアライメント系のアライメント光として使用するものである。このアライメント光は実質的に連続光にできるため、アライメントが容易になる。

また、本発明の第2の露光方法は、レーザ装置からの紫外光で第1物体を照明し、この第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する方法であって、単一波長のレーザ光を光ファイバー増幅器で増幅するとともに、このように増幅されたレーザ光をその紫外光に波長変換し、  
5 その紫外光を出力する期間と異なる条件でその紫外光を出力しない期間にもその光ファイバー増幅器に光を供給するものである。この露光方法によれば、本発明の露光装置と同様にそのレーザ装置を小型でメンテナンスの容易な構成にできると共に、レーザ光の外部への照射（オン）を開始した直後にも目標とする出力が得られる。

次に、本発明の露光装置の製造方法は、レーザ装置からの紫外光で第1物体（163）のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体（166）を露光する露光装置の製造方法であって、そのレーザ装置を、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（11）と、このレーザ光発生部から発生されるレーザ光の変調を行う光変調部（12）と、この光変調部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器（22，25）を有する光増幅部（18-1～18-n）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶（502～504）を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（20）とを所定の位置関係で配置して構成し、  
15 その光変調部を、その紫外光を出力する期間中はそのレーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調してその光増幅部に供給し、その紫外光を出力しない期間中にもその紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲でその光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給するように構成したものである。

また、本発明のデバイスの製造方法は、本発明の露光装置を用いてマスクパターンを基板上に転写する工程を含むものである。

## 図面の簡単な説明

図 1 は、本発明の第 1 の実施の形態の紫外光発生装置を示す図である。  
図 2 は、図 1 中の光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n の構成例を示す図  
5 である。図 3 において、(a) は図 1 中の波長変換部 20 の第 1 の構成  
例を示す図、(b) はその波長変換部 20 の第 2 の構成例を示す図であ  
る。図 4 において、(a) は波長変換部 20 の第 3 の構成例を示す図、  
(b) は波長変換部 20 の第 4 の構成例を示す図である。図 5 は、図 1  
の光ファイバー増幅器において光サージが生じる場合の説明図である。  
10 図 6 は、本発明の第 1 の実施の形態において光変調素子 12 から出力さ  
れるレーザ光の状態、及び最終的に出力される紫外域のレーザ光 LB5  
の状態を示す図である。図 7 は、本発明の第 2 の実施の形態の光変調部  
を示す構成図である。図 8 は、その第 2 の実施の形態における各レーザ  
及び光変調素子 12 の駆動方式の一例を示すタイミングチャートである。  
15 図 9 は、その第 2 の実施の形態における各レーザ及び光変調素子 12 の  
駆動方式の他の例を示すタイミングチャートである。図 10 は、本発明  
の第 3 の実施の形態の光変調部を示す構成図である。図 11 は、その第  
2 の実施の形態の変形例を示す構成図である。図 12 は、その第 3 の実  
施の形態の変形例を示す構成図である。図 13 は、上記の実施の形態の  
20 紫外光発生装置を適用した露光装置の一例を示す構成図である。

## 発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の好適な第 1 の実施の形態につき図面を参照して説明す  
る。本例は、ステッパやステップ・アンド・スキャン方式等の投影露  
25 光装置の紫外域の露光光源、又はアライメントや各種検査用の光源とし  
て使用できる紫外光発生装置に本発明を適用したものである。

図1 (a) は、本例の紫外光発生装置を示し、この図1 (a) において、レーザ光発生部としての単一波長発振レーザ11からスペクトル幅の狭い単一波長の例えば連続波 (CW) よりなる波長 $1.544\mu\text{m}$ のレーザ光LB1が発生する。このレーザ光LB1は、逆向きの光を阻止するためのアイソレータIS1を介して光変調部としての光変調素子12に入射し、ここでパルス光のレーザ光LB2に変換されて光分岐増幅部4に入射する。

光分岐増幅部4に入射したレーザ光LB2は、先ず前段の光増幅部としての光ファイバー増幅器13を通過して増幅された後、アイソレータIS2を介して第1の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ14に入射して、 $m$ 本のほぼ同一強度のレーザ光に分岐される。 $m$ は2以上の整数であり、本例では $m=4$ である。光ファイバー増幅器13としては、単一波長発振レーザ11から発生されるレーザ光LB1と同じ波長域 (本例では $1.544\mu\text{m}$ 付近) の光を増幅するために、エルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA) が使用されている。なお、光ファイバー増幅器13には不図示のカップリング用の波長分割多重素子を介して不図示の励起用の半導体レーザからの波長 $980\text{nm}$ の励起光が供給されている。エルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器 (EDFA) には $(980\pm10)\text{nm}$ 又は $(1480\pm30)\text{nm}$ の励起光が使用できる。しかしながら、非線形効果による波長の広がりを防止するためには、励起光として波長 $980\text{nm}$ 帯のレーザ光を使用して、ファイバー長を短くすることが望ましい。これによって、 $1480\text{nm}$ 帯の光を励起光に使用する場合に比べてASE (Amplified Spontaneous Emission) による光ファイバー増幅器13のノイズを小さくできる。これは後段の光ファイバー増幅器についても同様である。

なお、イッテルビウム（Yb）・ドープ・光ファイバー、及びエルビウムとイッテルビウムとをコ・ドープした光ファイバーの励起光としては  $(970 \pm 10)$  nmの光が使用できる。

5        スプリッタ 14 から射出された m 本のレーザ光は、互いに異なる長さの光ファイバー 15-1, 15-2, ..., 15-m を介してそれぞれ第 2 の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ 16-1, 16-2, ..., 16-m に入射して、それぞれほぼ同一強度の n 本のレーザ光に分岐される。n は 2 以上の整数であり、本例では  $n = 32$  である。第 1 の光分岐素子（14）及び第 2 の光分岐素子（16-1 ~ 16-m）が本  
10        発明の一実施形態の光分岐部に対応する。その結果、単一波長発振レーザ 11 から射出されるレーザ光 LB1 は、全体として  $n \cdot m$  本（本例では 128 本）のレーザ光に分岐される。

15        そして、スプリッタ 16-1 から射出された n 本のレーザ光 LB3 は、互いに異なる長さの光ファイバー 17-1, 17-2, ..., 17-n を介してそれぞれ後段の光増幅部としての光増幅ユニット 18-1, 18-2, ..., 18-n に入射して増幅される。光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n は、単一波長発振レーザ 11 から発生されるレーザ光 LB1 と同じ波長域（本例では  $1.544 \mu\text{m}$  付近）の光を増幅する。同様に他のスプリッタ 16-2 ~ 16-m から射出された n 本のレーザ光も、それぞれ互いに異なる長さの光ファイバー 17-1 ~ 17-n を介して後  
20        段の光増幅部としての光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n に入射して増幅される。

25        m 組の光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n で増幅されたレーザ光は、それぞれ光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n 内の所定の物質がドープされた光ファイバー（後述）の射出端の延長部を伝播し、これらの延長部が光ファイバー・バンドル 19 を構成する。光ファイバー・バンドル 1



9を構成するm組のn本の光ファイバーの延長部の長さは互いにほぼ同一である。但し、光ファイバー・バンドル19をm・n本の互いに同じ長さの無ドープの光ファイバーを束ねて形成すると共に、光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光をそれぞれ対応する無ドープの光ファイバーに導いてもよい。光ファイバー増幅器13から光ファイバー・バンドル19までの部材より光分岐増幅部4が構成されている。なお、光分岐増幅部4は図1の構成に限られるものではなく、例えば光分岐装置として時分割型光分岐素子（Time Division Multiplexer）などを用いてもよい。

光ファイバー・バンドル19から射出されたレーザ光LB4は、非線形光学結晶を有する波長変換部20に入射して紫外光よりなるレーザ光LB5に変換され、このレーザ光LB5が露光光、アライメント光、又は検査用の光として外部に射出される。m組の光増幅ユニット18-1～18-nがそれぞれ本発明の光増幅部に対応しているが、この光増幅部に光ファイバー・バンドル19の光ファイバーを含める場合もある。

また、光ファイバー・バンドル19の出力端19aは、図1（b）に示すように、m・n本（本例では128本）の光ファイバーを密着するように、かつ外形が円形になるように束ねたものである。実際には、その出力端19aの形状及び束ねる光ファイバーの数は、後段の波長変換部20の構成、及び本例の紫外光発生装置の使用条件等に応じて定められる。光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのクラッド直径は125μm程度であることから、128本を円形に束ねた場合の光ファイバー・バンドル19の出力端19aの直径d1は、約2mm以下とすることができる。

また、光ファイバー・バンドル19を構成する光ファイバーの本数は任意で良く、例えば露光装置では、ウエハ上での照度の要求値、照明系

や投影系の透過率、波長変換部 20 の変換効率、及び各光ファイバーの出力（パワー）に応じて決定される。また、それらの複数の光ファイバーを必ずしも光ファイバー・バンドルとして束ねることなく使用してもよい。

5       また、本例の波長変換部 20 では、入射するレーザー光 LB4 を 8 倍高調波（波長は  $1/8$ ）、又は 10 倍高調波（波長は  $1/10$ ）よりなるレーザー光 LB5 に変換する。単一波長発振レーザー 11 から射出されるレーザー光 LB1 の波長は  $1.544\ \mu\text{m}$  であるため、8 倍高調波の波長は ArF エキシマレーザーと同じ  $193\ \text{nm}$  となり、10 倍高調波の波長は  
10       F<sub>2</sub> レーザ（フッ素レーザー）の波長（ $157\ \text{nm}$ ）とほぼ同じ  $154\ \text{nm}$  となる。なお、レーザー光 LB5 の波長をより F<sub>2</sub> レーザ光の波長に近付けたい場合には、波長変換部 20 で 10 倍高調波を生成すると共に、単一波長発振レーザー 11 では波長  $1.57\ \mu\text{m}$  のレーザー光を発生すればよい。

15       実用的には、単一波長発振レーザー 11 の発振波長を  $1.544\sim 1.552\ \mu\text{m}$  程度に規定して、8 倍波に変換することにより、ArF エキシマレーザーと実質的に同一波長（ $193\sim 194\ \text{nm}$ ）の紫外光が得られる。そして、単一波長発振レーザー 11 の発振波長を  $1.57\sim 1.58\ \mu\text{m}$  程度に規定して、10 倍波に変換することによって F<sub>2</sub> レーザと  
20       実質的に同一波長（ $157\sim 158\ \text{nm}$ ）の紫外光が得られる。従って、これらの紫外光発生装置をそれぞれ ArF エキシマレーザー光源、及び F<sub>2</sub> レーザ光源に代わる安価でメンテナンスの容易な光源として使用することができる。

25       なお、最終的に ArF エキシマレーザー、又は F<sub>2</sub> レーザ等に近い波長域の紫外光を得る代わりに、例えば製造対象の半導体デバイス等のパターンルールより最適な露光波長（例えば  $160\ \text{nm}$  等）を決定し、この

理論的に最適な波長の紫外光を得るように単一波長発振レーザ 11 の発振波長や波長変換部 20 における高調波の倍率を決定するようにしてもよい。即ち、紫外光の波長は任意で良く、本レーザ装置が適用される製品での要求波長に応じて単一波長発振レーザ 11 の発振波長や波長変換部 20 での構成や変換倍率を決定すればよい。

以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図 1 (a) において、単一波長で発振する単一波長発振レーザ 11 としては、例えば発振波長  $1.544\ \mu\text{m}$ 、連続波出力（以下、「CW出力」ともいう）で出力が  $20\text{ mW}$  の  $\text{InGaAsP}$  構造の DFB (Distributed feedback: 分布帰還型) 半導体レーザを用いる。ここで DFB 半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロー型共振器の代わりに、回折格子を半導体レーザ内に形成したもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振を行うように構成されている。DFB 半導体レーザは、基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は  $0.01\text{ pm}$  以下に抑えられる。なお、単一波長発振レーザ 11 としては、同様の波長領域で狭帯域化されたレーザ光を発生する光源、例えばエルビウム ( $\text{Er}$ ) ・ドープ・ファイバー・レーザ等をも使用することができる。

更に、本例の紫外光発生装置の出力波長は用途に応じて特定波長に固定することが望ましい。そのため、マスター発振器 (Master Oscillator) としての単一波長発振レーザ 11 の発振波長を一定波長に制御するための発振波長制御装置を設けている。本例のように単一波長発振レーザ 11 として DFB 半導体レーザを用いる場合には、DFB 半導体レーザの温度制御を行うことにより発振波長を制御することができ、この方法により発振波長を更に安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整することができる。

通常、DFB半導体レーザなどはヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。そこで本例では、単一波長発振レーザ11（DFB半導体レーザなど）に付設されるヒートシンクに温度調整部5（例えばヒータ等の加熱素子、ペルチェ素子等の吸熱素子、及びサーミスタ等の温度検出素子よりなる）を固定し、その温度調整部5の動作をコンピュータよりなる制御部1が制御することで、そのヒートシンク、ひいては単一波長発振レーザ11の温度を高精度に制御する。ここで、DFB半導体レーザなどではその温度を0.001℃単位で制御することが可能である。また、制御部1は、ドライバ2を介して単一波長発振レーザ11を駆動するための電力（DFB半導体レーザでは駆動電流）を高精度に制御する。

DFB半導体レーザの発振波長は0.1nm/℃程度の温度依存性を持つため、そのDFB半導体レーザの温度を例えば1℃変化させると、基本波（波長1544nm）ではその波長が0.1nm変化する。従って、8倍波（193nm）ではその波長が0.0125nm変化し、10倍波（157nm）ではその波長が0.01nm変化することになる。なお、レーザ光LB5を露光装置に使用する場合には、例えば露光装置が設置される環境の大気圧差による結像特性の誤差、又は結像特性の変動による誤差等を補正するために、その中心波長に対して±20pm程度変化できることが望ましい。このためには、DFB半導体レーザの温度を8倍波では±1.6℃程度、10倍波では±2℃程度変化させればよく、これは実用的である。

そして、この発振波長を所定の波長に制御する際のフィードバック制御のモニター波長としては、DFB半導体レーザの発振波長、あるいは後述する波長変換部20内での波長変換後の高調波出力（2倍波、3倍波、4倍波等）の内から所望の波長制御を行うに当たって必要な感度を

与え、かつ最もモニターしやすい波長を選択すればよい。単一波長発振レーザ 11 として例えば発振波長  $1.51 \sim 1.59 \mu\text{m}$  の DFB 半導体レーザを使用する場合に、この発振レーザ光の 3 倍波は  $503 \text{ nm} \sim 530 \text{ nm}$  の波長になるが、この波長帯はヨウ素分子の吸収線が密に存在する波長域に該当しており、ヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長にロックすることにより精密な発振波長制御を行うことが可能である。そこで、本例では波長変換部 20 内の所定の高調波（望ましくは 3 倍波）をヨウ素分子の適切な吸収線（基準波長）と比較し、その波長のずれ量を制御部 1 にフィードバックし、制御部 1 ではそのずれ量が所定の一定値になるように温度調整部 5 を介して単一波長発振レーザ 11 の温度を制御する。逆に、制御部 1 では、その単一波長発振レーザ 11 の発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整可能にしてもよい。

本例の紫外光発生装置を例えば露光装置の露光光源に適用する場合、前者によれば、波長変動による投影光学系の収差の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがなくなる。また、後者によれば、露光装置が組立、調整される製造現場と露光装置の設置場所（納入先）との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに応じて生じる投影光学系の結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。更に後者によれば、露光装置の稼働中に、露光用照明光の照射、大気圧変化、及び照明光学系によるレチクルの照明条件（即ち、照明光学系の瞳面上での露光用照明光の光量分布）の変更などに起因して生じる投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

単一波長発振レーザ 11 から出力される連続光よりなるレーザ光 LB

1 は、例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子 1 2 を用いて、パルス光よりなるレーザ光 L B 2 に変換される。光変調素子 1 2 は制御部 1 によってドライバ 3 を介して駆動される。光変調素子 1 2 は、光供給部の一部ともみなすことができる。本例の光変調素子 1 2 から出力されるレーザ光 L B 2 は、図 6 (a) 及び (b) に示すように、紫外光としてのレーザ光 L B 5 を出力する期間、即ちオン (ON) の期間では、ピークレベル L B のパルス列であり、紫外光としてのレーザ光 L B 5 を出力しない期間、即ちオフ (OFF) の期間では、レベル L A の連続光である。なお、図 6 (a), (b) において (図 5 も同様)、横軸は時間  $t$  であり、縦軸はレーザ光の出力 (単位時間当たりのエネルギー) である。

また、図 6 において、紫外光がオンの期間のレーザ光 L B 2 の平均レベル (積分した場合の平均値) と、紫外光がオフの期間のレーザ光 L B 2 の平均レベル (= L A) とはほぼ等しくなるように設定されている。

この場合、紫外光がオンの期間のレーザ光 L B 2 のデューティ比 (パルス周期に対するハイレベル “1” の期間の割合 (%)) は  $1/10$  以下で、通常は  $1/10000$  程度に設定されているため、そのレベル L A はピークレベル L B に対して  $1/10$  以下で、通常は  $1/10000$  程度以下となる。このように紫外光がオフの期間でもレーザ光 L B 2 のレベルを所定のレベル L A に維持することによって、紫外光をオンにする際に後段の光ファイバー増幅器 1 3、及び光増幅ユニット 1 8-1 ~ 1 8-n 内の光ファイバー増幅器 (図 2 の光ファイバー増幅器 2 2, 2 5) において、光サージによって利得が増加して紫外光 (レーザ光 L B 5) の出力が増加することが防止される。これに対して、図 5 (a) に示すように、紫外光がオフの期間にレーザ光 L B 2 の出力を 0 にすると、図 5 (b) に示すように、紫外光をオンにした直後の期間 T S において、

後段の光ファイバー増幅器の光サージが生じて紫外光（レーザ光LB5）のパルス列のピークレベルが高くなり、その紫外光の出力が目標値から外れることになる。

また、図1の波長変換部20は、入力するレーザ光LB4を例えば3  
5 段以上の非線形光学結晶を通して紫外光であるレーザ光LB5に変換している（詳細後述）。この際に各非線形光学結晶においては、入射する光のピークレベルの自乗、又は入射する2つの光のピークレベルの積にほぼ比例して波長変換が行われるため、波長変換部20から出力されるレーザ光LB5の出力は、入射するレーザ光LB4のピークレベルの8  
10 乗（ $=2^3$  乗）以上の係数に比例する。従って、図6において、紫外光がオンの期間のレーザ光LB2のピークレベルLBに対して、紫外光がオフの期間のレーザ光LB2のレベルLAは $1/10$ 以下で、通常は $1/10000$ 程度以下であるため、レベルLAの光は殆ど紫外光（レーザ光LB2）に変換されないため、紫外光がオフの期間ではレーザ光LB5のレベルはほぼ完全に0となる。従って、オンの期間でもオフの期間でも紫外光（レーザ光LB5）の出力は目標値通りとなる。

本構成例では一例として、光変調素子12によってパルス幅1ns、繰り返り周波数100kHz（パルス周期10 $\mu$ s）のパルス光に変調させた場合について説明を行う。この様な光変調を行った結果、紫外光  
20 がオンの期間に光変調素子12から出力されるパルス光のピーク出力LBは20mW、平均出力は2 $\mu$ Wとなる。そこで、その紫外光がオフの期間に光変調素子12から出力される連続光のレベルLAは2 $\mu$ W、即ちLB $/10000$ となる。ここでは、光変調素子12の挿入による損失がないものとしたが、実際にはその挿入損失がある。例えば損失が  
25 3dBである場合、パルス光のピーク出力は10mW、平均出力は1 $\mu$ Wとなる。

なお、光変調素子 12 として電気光学変調素子を用いる場合には、屈折率の時間変化に伴うチャープによる半導体レーザ出力の波長広がり小さくなるように、チャープ補正を行った電極構造を持つ電気光学変調素子（例えば二電極型変調器）を用いることが好ましい。また、繰り返  
5 し周波数を 100 kHz 程度以上に設定することにより、後述する光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n 内の光ファイバー増幅器において ASE（Amplified Spontaneous Emission：自然放出光）ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができる。更に、最終的に出力される紫外光の照度が従来のエキシマレーザ光（パルス周波数は数 kHz 程度）と同  
10 程度でよい場合には、本例のようにパルス周波数を高め、各パルスを例えば 128 個の遅延パルスとすることによって、各パルス当たりのエネルギーを  $1/1000 \sim 1/10000$  程度に小さくすることができ、コンパクション等による光学部材（レンズ等）の屈折率変動等を小さく  
15 することができる。従って、そのような変調器構成とすることが望ましい。

更に、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができる。このため、本例では単一波長発振レーザ  
11（DFB 半導体レーザなど）の電力制御と光変調素子 12 とを併用してパルス光を発生させることが好ましい。そこで、単一波長発振レー  
20 ザ 11 の電力制御によって、例えば 10 ~ 20 ns 程度のパルス幅を有するパルス光を発振させると共に、光変調素子 12 によってそのパルス光からその一部のみを切り出す、即ち本例ではパルス幅が 1 ns のパルス光に変調する。また、光変調素子 12 のみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、単一波長発振レーザ 1  
25 1 の電力制御を併用することが望ましい。

図 1（a）において、そのようにして得たパルス光出力を、初段のエ



ルビウム・ドープの光ファイバー増幅器 13 に供給し、35 dB (316.2 倍) の光増幅を行う。このときパルス光は、ピーク出力約 6.3 W、平均出力約 6.3 mW となる。なお、この光ファイバー増幅器 13 の代わりに複数段の光ファイバー増幅器を使用してもよい。

- 5        その初段の光ファイバー増幅器 13 の出力を、スプリッタ 14 でまずチャンネル 0～3 の 4 個の出力 (本例では  $m=4$ ) に並列分割する。このチャンネル 0～3 の各出力を、各々長さの異なる光ファイバー 15-1～15-4 に接続することにより、各光ファイバーからの出力光には、光ファイバー長に対応した遅延時間が与えられる。例えば本実施形態では、  
10      光ファイバー中の光の伝搬速度を  $2 \times 10^8$  m/s であるとし、チャンネル 0、1、2、3 にそれぞれ 0.1 m、19.3 m、38.5 m、57.7 m の長さの光ファイバー 15-1～15-4 を接続する。この場合、各光ファイバーの出口での隣り合うチャンネル間の光の遅延は 96 ns となる。なおここでは、この様に光を遅延させる目的で使用する光ファイ  
15      バー 15-1～15-4 を、便宜的に「遅延ファイバー」と呼ぶ。

- 次に、その 4 本の遅延ファイバーの出力を、4 個のスプリッタ 16-1～16-4 で更に  $n$  個 (本例では  $n=32$ ) の出力に並列分割 (各スプリッタでチャンネル 0～31) し、合計  $4 \times 32$  個 ( $=128$  個) のチャンネルに分割する。そして、各スプリッタ 16-1～16-4 のチャンネル 0～31 の出力端に再び互いに長さの異なる光ファイバー (遅延ファイバー) 17-1～17-32 を接続して、隣接するチャンネル間に 3 ns の遅延時間を与える。これによって、チャンネル 31 の出力には、93 ns の遅延時間が与えられる。一方、第 1 から第 4 までの各スプリッタ 16-1～16-4 間には、そののように遅延ファイバーによって、各  
20      スプリッタの入力時点で各々 96 ns の遅延時間が与えられている。この結果、全体で総計 128 チャンネルの出力端で、隣り合うチャンネル間に  
25

3 n s の遅延時間を持つパルス光が得られる。

この結果、本例では光ファイバー・バンドル 1 9 から射出されるレーザ光 L B 4 の空間的コヒーレンスが、単に単一波長発振レーザ 1 1 から射出されるレーザ光 L B 1 の断面形状を拡大した場合に比べてほぼ 1 / 1 2 8 のオーダーで低下する。従って、最終的に得られるレーザ光 L B 5 を露光光として用いた場合に生じるスペックルの量は極めて少ない利点がある。

以上の分岐及び遅延により、総計 1 2 8 チャンネルの出力端では、隣り合うチャンネル間で 3 n s の遅延時間を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、光変調素子 1 2 によって変調されたパルス光と同じ 1 0 0 k H z （パルス周期 1 0  $\mu$  s ）である。従って、レーザ光発生部全体として見ると、1 2 8 パルスが 3 n s 間隔で発生した後、9 . 6 2  $\mu$  s の間隔を置いて次のパルス列が発生するという繰り返しが 1 0 0 k H z で行われる。

なお本実施形態では、分割数を 1 2 8 とし、また遅延ファイバーとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に 9 . 6 2  $\mu$  s の無発光の間隔が生じたが、分割数 m, n を増加させる、又は遅延ファイバーをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせるにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。

以上より本例のスプリッタ 1 4、光ファイバー 1 5 - 1 ~ 1 5 - m、スプリッタ 1 6 - 1 ~ 1 6 - m、及び m 組の光ファイバー 1 7 - 1 ~ 1 7 - n は、全体として時分割多重（Time Division Multiplexing: T D M）手段を構成しているともみなすことができる。なお、本例ではその時分割多重手段を 2 段のスプリッタによって構成しているが、それを 3 段以上のスプリッタで構成してもよく、又は分割数は少なくなるが 1 段

のスプリッタのみで構成してもよい。また、本例のスプリッタ 14, 16-1 ~ 16-m は平板導波路型であるが、それ以外に例えばファイバースプリッタや、部分透過鏡を用いたビームスプリッタ等も使用することができる。

5       また、本例では光変調素子 12 に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングを制御することによって、光源（パルス光）の発振タイミング、即ち繰り返し波数  $f$  を調整することができる。更に、この発振タイミングの変更に伴ってパルス光の出力が変動し得る場合には、光変調素子 12 に印加するドライブ用電圧パルスの大きさも同時に調整してその出力  
10       変動を補償するようにしてもよい。このとき、単一波長発振レーザ 11 の発振制御のみ、あるいは前述した光変調素子 12 の制御との併用によってそのパルス光の出力変動を補償するようにしても良い。図 1 (a) において、 $m$  組の遅延ファイバー（光ファイバー 17-1 ~ 17-n）を通過したレーザ光はそれぞれ光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n に入射して増幅される。本例の光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n は光ファイバー増幅器を備えており、以下では、光増幅ユニット 18-1 として  
15       使用できる光増幅ユニットの構成例につき説明するが、これらは他の光増幅ユニット 18-2 ~ 18-n としても同様に使用することができる。

図 2 は、光増幅ユニット 18 を示し、この図 2 において、光増幅ユニット 18 は基本的に 2 段のそれぞれエルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA）よりなる光ファイバー増幅器 22 及び 25 を接続して構成されている。そして、1 段目の光ファイバー増幅器 22 の両端部には、励起光をカップリングするための波長分割多重（Wavelength Division Multiplexing: WDM）素子  
20       （以下、「WDM 素子」と言う）21A 及び 21B が接続され、WDM 素子 21A 及び 21B によってそれぞれ励起光源としての半導体レーザ

2 3 Aからの励起光 E L 1 及び半導体レーザ 2 3 Bからの励起光が、光ファイバー増幅器 2 2 に前後から供給されている。同様に、2 段目の光ファイバー増幅器 2 5 の両端部にも、カップリング用の WDM 素子 2 1 C 及び 2 1 D が接続され、WDM 素子 2 1 C 及び 2 1 D によってそれぞれ半導体レーザ 2 3 C 及び 2 3 D からの励起光が光ファイバー増幅器 2 5 に前後から供給されている。即ち、光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 は共に双方向励起型である。

光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 はそれぞれ入射するレーザ光 L B 3 (本例では波長  $1.544 \mu\text{m}$ ) の波長を含む例えば約  $1.53 \sim 1.56 \mu\text{m}$  程度の波長域の光を増幅する。また、光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 の境界部である WDM 素子 2 1 B と WDM 素子 2 1 C との間に、狭帯域フィルタ 2 4 A 及び戻り光を阻止するためのアイソレータ I S 3 が配置されている。狭帯域フィルタ 2 4 A としては多層膜フィルタ、又はファイバー・ブラッグ・グレーティング (Fiber Bragg Grating) が使用できる。

本例において、図 1 (a) の光ファイバー 1 7 - 1 からのレーザ光 L B 3 は、WDM 素子 2 1 A を介して光ファイバー増幅器 2 2 に入射して増幅される。この光ファイバー増幅器 2 2 で増幅されたレーザ光 L B 3 は、WDM 素子 2 1 B、狭帯域フィルタ 2 4 A、アイソレータ I S 3、及び WDM 素子 2 1 C を介して光ファイバー増幅器 2 5 に入射して再び増幅される。増幅されたレーザ光 L B 3 は、WDM 素子 2 1 D を介して図 1 (a) の光ファイバー・バンドル 1 9 を構成する 1 本の光ファイバー (光ファイバー増幅器 2 5 の射出端の延長部でもよい) を伝播する。

この場合、2 段の光ファイバー増幅器 2 2 及び 2 5 による合計の増幅利得は一例として約 46 dB (39810 倍) である。そして、図 1 (b) のスプリッタ 1 6 - 1 ~ 1 6 - m から出力される全チャネル数

( $m \cdot n$  個) を 128 個として、各チャネルの平均出力を約  $50 \mu\text{W}$  とすると、全チャネル合計での平均出力は約  $6.4 \text{ mW}$  となる。その各チャネルのレーザ光をそれぞれ約  $46 \text{ dB}$  で増幅すると、各光増幅ユニット  $18-1 \sim 18-n$  から出力されるレーザ光の平均出力はそれぞれ約  $2 \text{ W}$  となる。これをパルス幅  $1 \text{ ns}$ 、パルス周波数  $100 \text{ kHz}$  でパルス化したものとする、各レーザ光のピーク出力は  $20 \text{ kW}$  となる。また、光ファイバー・バンドル 19 から出力されるレーザ光 LB4 の平均出力は約  $256 \text{ W}$  となる。

ここでは、図 1 (a) のスプリッタ 14、 $16-1 \sim 16-m$  での結合損失を考慮していないが、その結合損失がある場合にはその損失分だけ光ファイバー増幅器 22、25 の少なくとも 1 つの増幅利得を上げることにより、各チャネルのレーザ光の出力を上記の値（例えばピーク出力  $20 \text{ kW}$  など）に均一化することができる。なお、図 2 の光ファイバー増幅器 22 及び 25 による増幅利得を変化させることで、図 1 (a) の単一波長発振レーザ 11 の出力（基本波の出力）を前述した値よりも大きくしたり、あるいは小さくしたりすることができる。

図 2 の構成例において、狭帯域フィルタ 24A は、図 1 (a) の光ファイバー増幅器 13 及び図 2 の光ファイバー増幅器 22 でそれぞれ発生する ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光をカットし、かつ図 1 (a) の単一波長発振レーザ 11 から出力されるレーザ光（波長幅は  $1 \text{ pm}$  程度以下）を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ASE 光が後段の光ファイバー増幅器 25 に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止することができる。ここで、狭帯域フィルタ 24A はその透過波長幅が  $1 \text{ pm}$  程度であることが好ましいが、ASE 光の波長幅は数十  $\text{nm}$  程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が  $100 \text{ pm}$  程度の狭帯域フィルタを用い

でも実用上問題がない程度にASE光をカットすることができる。

また、図1(a)の単一波長発振レーザ11の出力波長を積極的に変化させる場合、その出力波長に応じて狭帯域フィルタ24Aを交換するようにしてもよいが、その出力波長の可変幅（露光装置では一例として  
5 前述した $\pm 20$  pm程度）に応じた透過波長幅（可変幅と同程度以上）を持つ狭帯域フィルタを用いることが好ましい。また、アイソレータIS3によって戻り光の影響が低減される。光増幅ユニット18は例えば3段以上の光ファイバー増幅器を接続して構成することも可能であるが、この場合にも隣接する2つの光ファイバー増幅器の境界部の全てに狭帯  
10 域フィルタ24A及びアイソレータIS3を挿入することが望ましい。

また、本例では多数の光増幅ユニット18の出力光を束ねて使用するため、各出力光の強度の分布を均一化することが望ましい。このためには、例えばWDM素子21Dから射出されるレーザ光LB3の一部を分離し、この分離された光を光電変換することによって、射出されるレー  
15 ザ光LB3の光量をモニタし、この光量が全部の光増幅ユニット18でほぼ均一になるように、各光増幅ユニット18における励起光源（半導体レーザ23A～23D）の出力を制御すればよい。

なお、上記の実施の形態では、単一波長発振レーザ11として発振波長が $1.544\text{ }\mu\text{m}$ 程度のレーザ光源が使用されているが、その代わりに  
20 に発振波長 $1.099\sim 1.106\text{ }\mu\text{m}$ 程度のレーザ光源を使用してもよい。このようなレーザ光源としては、DFB半導体レーザあるいはイッテルビウム（Yb）・ドープ・ファイバーレーザが使用できる。この場合には、後段の光増幅部中の光ファイバー増幅器としては、その波長を含む $990\sim 1200\text{ nm}$ 程度の波長域で増幅を行うイッテルビウム  
25 （Yb）・ドープ・光ファイバー（YDFA）を使用すればよい。この場合には、図1(b)の波長変換部20において、7倍波を出力するこ

とによって、F<sub>2</sub> レーザと実質的に同一の波長 1 5 7 ~ 1 5 8 n m の紫外光が得られる。実用的には、発振波長を 1 . 1 μ m 程度とすることで、F<sub>2</sub> レーザとほぼ同一波長の紫外光が得られる。

5 更には、単一波長発振レーザ 1 1 での発振波長を 9 9 0 n m 付近として、波長変換部 2 0 で基本波の 4 倍波を出力するようにしてもよい。これによって、K r F エキシマレーザと同一の波長 2 4 8 n m の紫外光を得ることが可能である。

10 なお、上記の実施形態における最終段の高ピーク出力の光ファイバー増幅器（例えば図 2 の光増幅ユニット 1 8 中の光ファイバー増幅器 2 5）においては、ファイバー中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるため、ファイバーモード径が通常通信で用いられているもの（5 ~ 6 μ m）よりも広い、例えば 2 0 ~ 3 0 μ m の大モード径ファイバーを使用することが望ましい。

15 更に、最終段の光ファイバー増幅器（例えば図 2 の光ファイバー増幅器 2 5）において高出力を得るためには、その大モード径ファイバーに代えて、ファイバー・クラッドが二重構造となったダブル・クラッド・ファイバーを用いるようにしてもよい。この光ファイバーでは、コアの部分にレーザ光の増幅に寄与するイオンがドーピングされており、増幅されるレーザ光（信号）がこのコア内を伝搬する。そして、コアを取り巻く  
20 第 1 クラッドに励起用半導体レーザをカップリングする。この第 1 クラッドはマルチモードであり、断面積も大きいいため高出力の励起用半導体レーザ光の伝導が容易であり、マルチモード発振の半導体レーザを効率よくカップリングし、励起用光源を効率よく使用することができる。その第 1 クラッドの外周には第 1 クラッドの導波路を形成するための第 2  
25 クラッドが形成されている。

また、上記の実施の形態の光ファイバー増幅器として石英ファイバー、

又はシリケート系ファイバーを用いることができるが、これらの他にフッ化物系ファイバー、例えばZBLANファイバーを用いるようにしてもよい。このフッ化物系ファイバーでは、石英やシリケート系などに比べてエルビウム・ドープ濃度を大きくすることができ、これにより増幅に必要なファイバー長を短縮することができる。このフッ化物系ファイバーは、特に最終段の光ファイバー増幅器（図2の光ファイバー増幅器25）に適用することが望ましく、ファイバー長の短縮により、パルス光のファイバー伝播中の非線形効果による波長幅の広がりを抑えることができ、例えば露光装置に必要な波長幅が狭帯化された光源を得ることが可能となる。特に開口数が大きい投影光学系を有する露光装置でこの狭帯化光源が使用できることは、例えば投影光学系を設計、製造する上で有利である。

更に、フォスフェイトガラス、又は酸化ビスマス系ガラス（ $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ ）を主材とする光ファイバーを、特に最終段の光ファイバー増幅器として用いるようにしてもよい。ここで、フォスフェイトガラス光ファイバーでは、高密度に希土類元素（例えばエルビウム（Er）、又はエルビウム（Er）とイッテルビウム（Yb）との両方）をコアに添加（ドープ）することができ、同一の光増幅率を得るために必要なファイバ長が従来のシリカガラス光ファイバーの1/100程度となる。また、酸化ビスマス系ガラス光ファイバーでは、従来のシリカガラスと比べて、エルビウム（Er）のドープ量を100倍程度以上にすることができ、フォスフェイトガラスの場合と同様の効果を得ることができる。

ところで、前述のように二重構造のクラッドを持つ光ファイバー増幅器の出力波長として1.51～1.59  $\mu\text{m}$ を使用する場合には、ドープするイオンとしてエルビウム（Er）に加えイッテルビウム（Yb）を共にドープすることが好ましい。これは半導体レーザによる励起効率



を向上させる効果があるためである。すなわち、エルビウムとイッテルビウムとの両方をドーピングする場合、イッテルビウムの強い吸収波長が915～975 nm付近に広がっており、この近傍の波長で各々異なる発振波長を持つ複数の半導体レーザを波長分割多重（WDM）により結合させて第1クラッドにカップリングすることで、その複数の半導体レーザを励起光として使用できるため大きな励起強度を実現することができる。

また、光ファイバー増幅器のドーピング・ファイバーの設計については、本例のように予め定められた一定の波長で動作する装置（例えば露光装置）では、所望の波長における光ファイバー増幅器の利得が大きくなるように材質を選択することが望ましい。例えば、ArFエキシマレーザと同じ出力波長（193～194 nm）を得るための紫外レーザ装置において、光増幅器用ファイバーを用いる場合には所望の波長、例えば1.548  $\mu$ mで利得が大きくなる材質を選ぶことが望ましい。

しかしながら、通信用ファイバーでは波長分割多重化通信のため、1.55  $\mu$ m付近の数十nmの波長領域で、比較的平坦な利得を持つように設計されている。そこで、例えば励起媒質としてエルビウム単ドーピングのコアを持つ通信用ファイバーでは、この平坦な利得特性を実現するために、アルミニウムやリンをシリカファイバーにコ・ドーピングする手法が用いられる。このためこの種のファイバーでは、1.548  $\mu$ mで必ずしも利得が大きくなる。また、ドーピング元素のアルミニウムは、1.55  $\mu$ m付近のピークを長波長側にシフトさせ、リンは短波長側にシフトさせる効果を持つ。従って、1.547  $\mu$ m近傍で利得を大きくするためには、少量のリンをドーピングすればよい。同様に、例えばエルビウムとイッテルビウムとを共にドーピング（コ・ドーピング）したコアを持つ光増幅器用ファイバー（例えばそのダブル・クラッド・タイプのファイバー）

を用いる場合にも、コアに少量のリンを加えることにより、 $1.547\ \mu\text{m}$ 付近でより高い利得を得ることができる。

次に、図1の実施の形態の紫外光発生装置における波長変換部20のいくつかの構成例につき説明する。

5 図3(a)は、2次高調波発生を繰り返して8倍波を得ることができる波長変換部20を示し、この図3(a)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19a(拡大して表示されている)から出力された波長 $1.544\ \mu\text{m}$ (周波数を $\omega$ とする)の基本波としてのレーザ光LB4は、1段目の非線形光学結晶502に入射し、ここでの2次高調波  
10 発生により基本波の2倍の周波数 $2\omega$ (波長は $1/2$ の $772\ \text{nm}$ )の2倍波が発生する。この2倍波は、レンズ505を経て2段目の非線形光学結晶503に入射し、ここでも再び2次高調波発生により、入射波の2倍、即ち基本波に対し4倍の周波数 $4\omega$ (波長は $1/4$ の $386\ \text{nm}$ )を持つ4倍波が発生する。発生した4倍波は更にレンズ506を介  
15 して3段目の非線形光学結晶504に進み、ここで再び2次高調波発生によって、入射波の2倍、即ち基本波に対し8倍の周波数 $8\omega$ を有する8倍波(波長は $1/8$ の $193\ \text{nm}$ )が発生する。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。即ち、この構成例では、基本波(波長 $1.544\ \mu\text{m}$ ) $\rightarrow$ 2倍波(波長 $772\ \text{nm}$ ) $\rightarrow$ 4倍波(波長 $386\ \text{nm}$ ) $\rightarrow$ 8倍波(波長 $193\ \text{nm}$ )の順に波長変換が行われる。

前記波長変換に使用する非線形光学結晶としては、例えば基本波から2倍波への変換を行う非線形光学結晶502には $\text{LiB}_3\text{O}_5$ (LBO)結晶を、2倍波から4倍波への変換を行う非線形光学結晶503には $\text{LiB}_3\text{O}_5$ (LBO)結晶を、4倍波から8倍波への変換を行う非線形  
25 光学結晶504には $\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$ (SBBO)結晶を使用する。ここで、LBO結晶を使用した基本波から2倍波への変換には、波長変

換のための位相整合にL B O結晶の温度調節による非臨界位相整合（Non-Critical Phase Matching: N C P M）を使用する。N C P Mは、非線形光学結晶内での基本波と第二高調波との間の角度ずれである「Walk-off」が起こらないため、高効率で2倍波への変換を可能にし、また発生した2倍波はWalk-offによるビームの変形も受けないため有利である。

なお、図8（a）において、光ファイバー・バンドル19と非線形光学結晶502との間に、レーザ光L B 4の入射効率を高めるために集光レンズを設けることが望ましい。この際に、光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのモード径（コア径）は例えば20  $\mu$ m程度であり、非線形光学結晶中で変換効率の高い領域の大きさは例えば200  $\mu$ m程度であるため、各光ファイバー毎に10倍程度の倍率の微小レンズを設けて、各光ファイバーから射出されるレーザ光を非線形光学結晶502中に集光するようにしてもよい。これは以下の構成例でも同様である。

次に、図3（b）は2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせで8倍波を得ることができる波長変換部20Aを示し、この図3（b）において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長1.544  $\mu$ mのレーザ光L B 4（基本波）は、L B O結晶よりなり上記のN C P Mで制御されている1段目の非線形光学結晶507に入射し、ここでの2次高調波発生により2倍波が発生する。更に、非線形光学結晶507中を基本波の一部がそのまま透過する。この基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板（例えば1/2波長板）508を透過して、基本波のみが偏光方向が90度回転した状態で射出される。この基本波と2倍波とはそれぞれレンズ509を通過して2段目の非線形光学結晶510に入射する。

非線形光学結晶510では、1段目の非線形光学結晶507で発生し

た 2 倍波と、変換されずに透過した基本波とから和周波発生により 3 倍波を得る。非線形光学結晶 5 1 0 としては L B O 結晶が用いられるが、1 段目の非線形光学結晶 5 0 7 (L B O 結晶) とは温度が異なる N C P M で使用される。非線形光学結晶 5 1 0 で得られた 3 倍波と、波長変換されずに透過した 2 倍波とは、ダイクロイック・ミラー 5 1 1 により分離されて、ダイクロイック・ミラー 5 1 1 で反射された 3 倍波は、ミラー M 1 で反射されレンズ 5 1 3 を通って 3 段目の  $\beta$ -B a B<sub>2</sub> O<sub>4</sub> (B B O) 結晶よりなる非線形光学結晶 5 1 4 に入射する。ここで 3 倍波が 2 次高調波発生により 6 倍波に変換される。

一方、ダイクロイック・ミラーを透過した 2 倍波はレンズ 5 1 2 及びミラー M 2 を経てダイクロイック・ミラー 5 1 6 に入射し、非線形光学結晶 5 1 4 で得られた 6 倍波もレンズ 5 1 5 を経てダイクロイック・ミラー 5 1 6 に入射し、ここでその 2 倍波と 6 倍波とは同軸に合成されて 4 段目の B B O 結晶よりなる非線形光学結晶 5 1 7 に入射する。非線形光学結晶 5 1 7 では、6 倍波と 2 倍波とから和周波発生により 8 倍波 (波長 1 9 3 n m) を得る。この 8 倍波は紫外のレーザ光 L B 5 として射出される。なお、4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 として、B B O 結晶の代わりに C s L i B<sub>6</sub> O<sub>10</sub> (C L B O) 結晶を用いることも可能である。この波長変換部 2 0 A では、基本波 (波長 1 . 5 4 4  $\mu$  m) → 2 倍波 (波長 7 7 2 n m) → 3 倍波 (波長 5 1 5 n m) → 6 倍波 (波長 2 5 7 n m) → 8 倍波 (波長 1 9 3 n m) の順に波長変換が行われている。

このように 6 倍波と 2 倍波との一方が分岐光路を通して 4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 に入射する構成では、6 倍波と 2 倍波とをそれぞれ 4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 に集光して入射させるレンズ 5 1 5, 5 1 2 を互いに異なる光路に配置することができる。この場合、3 段目の非線形光学結晶 5 1 4 で発生した 6 倍波はその断面形状が「Walk-off」現

象により長円形になっているため、4段目の非線形光学結晶 5 1 7 で良好な変換効率を得るためには、その6倍波のビーム整形を行うことが望ましい。そこで本例のように、レンズ 5 1 5, 5 1 2 を別々の光路に配置することにより、例えばレンズ 5 1 5 としてシリンドリカルレンズ対  
5 を用いること等が可能となり、6倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、4段目の非線形光学結晶（BBO結晶）5 1 7 での2倍波との重なり部を増加させて、変換効率を高めることが可能である。

なお、2段目の非線形光学結晶 5 1 0 と4段目の非線形光学結晶 5 1 7 との間の構成は図 3（b）に限られるものではなく、4段目の非線形  
10 光学結晶 5 1 7 に6倍波と2倍波とが同時に入射するように、6倍波と2倍波とでその光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であってもよい。更に、例えば2段目の非線形光学結晶 5 1 0 と同一光軸上に3段目及び4段目の非線形光学結晶 5 1 4, 5 1 7 を配置し、3段目の非線形光学結晶 5 1 4 で3倍波のみを2次高調波発生により6倍波に変換し  
15 て、波長変換されない2倍波と共に4段目の非線形光学結晶 5 1 7 に入射させてもよく、これによりダイクロイック・ミラー 5 1 1, 5 1 6 を用いる必要がなくなる。これらは後述の図 4 の構成例でも同様である。

また、図 3（a）及び（b）に示した波長変換部 2 0, 2 0 A についてそれぞれ各チャネル当たりの8倍波（波長 1 9 3 nm）の平均出力を  
20 実験的に求めて見た。基本波の出力は前述の実施形態で説明した通り各チャネルの出力端で、ピーク・パワー 2 0 kW、パルス幅 1 ns、パルス繰り返し周波数 1 0 0 kHz、及び平均出力 2 W である。この結果、各チャネル当たりの8倍波の平均出力は、図 3（a）の波長変換部 2 0 では 2 2 9 mW、図 3（b）の波長変換部 2 0 A では 3 8. 3 mW であ  
25 った。従って、全 1 2 8 チャネルを合わせたバンドルからの平均出力は、波長変換部 2 0 では 2 9 W、波長変換部 2 0 A では 4. 9 W となり、何

れの波長変換部 20, 20Aであっても露光装置用光源として十分な出力の、波長 193 nm の紫外光を提供することができる。

次に、F<sub>2</sub> レーザ（波長 157 nm）とほぼ同一の波長の紫外光を得るための波長変換部の構成例につき説明する。この場合には、図 1（a）の単一波長発振レーザ 11 において発生する基本波の波長を 1.57  $\mu$ m として、波長変換部 20 として 10 倍波の発生を行う波長変換部を使用すればよい。

図 4（a）は、2 次高調波発生と和周波発生とを組み合わせることで 10 倍波を得ることができる波長変換部 20B を示し、この図 4（a）において、光ファイバー・バンドル 19 の出力端 19a から射出された波長 1.57  $\mu$ m のレーザ光 LB4 の基本波は、LBO 結晶よりなる 1 段目の非線形光学結晶 602 に入射し、2 次高調波発生により 2 倍波に変換される。この 2 倍波は、レンズ 603 を介して LBO よりなる第 2 の非線形光学結晶 604 に入射して、2 次高調波発生による 4 倍波に変換され、一部は 2 倍波のままで透過する。

非線形光学結晶 604 を透過した 4 倍波及び 2 倍波は、ダイクロイック・ミラー 605 に向かい、ダイクロイック・ミラー 605 で反射された 4 倍波は、ミラー M1 で反射されレンズ 608 を通って 3 段目の Sr<sub>2</sub>Be<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub>（SBB O）結晶よりなる非線形光学結晶 609 に入射して、2 次高調波発生により 8 倍波に変換される。一方、ダイクロイック・ミラー 605 を透過した 2 倍波はレンズ 606 及びミラー M2 を経てダイクロイック・ミラー 607 に入射し、非線形光学結晶 609 で得られた 8 倍波もレンズ 610 を経てダイクロイック・ミラー 607 に入射し、ここでその 2 倍波と 8 倍波とは同軸に合成されて 4 段目の SBB O 結晶よりなる非線形光学結晶 611 に入射し、ここで 8 倍波と 2 倍波とからの和周波発生により 10 倍波（波長 157 nm）が得られる。

この10倍波は紫外のレーザー光LB5として射出される。即ち、波長変換部20Bでは、基本波（波長 $1.57\mu\text{m}$ ）→2倍波（波長 $785\text{nm}$ ）→4倍波（波長 $392.5\text{nm}$ ）→8倍波（波長 $196.25\text{nm}$ ）→10倍波（波長 $157\text{nm}$ ）の順に波長変換が行われる。

5        また、F<sub>2</sub> レーザ（波長 $157\text{nm}$ ）とほぼ同一波長の紫外光を得るためには、図1（a）の単一波長発振レーザー11において発生する基本波の波長を $1.099\mu\text{m}$ として、波長変換部20として7倍波の発生を行う波長変換部を使用する方法も考えられる。

10        図4（b）は、2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせる7倍波を得ることができる波長変換部20Cを示し、この図4（b）において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長 $1.099\mu\text{m}$ のレーザー光LB4（基本波）は、LBO結晶よりなる1段目の非線形光学結晶702に入射し、ここでの2次高調波発生により2倍波が発生し、基本波の一部はそのまま透過する。この基本波及び2倍波は、  
15        共に直線偏光状態で波長板（例えば1/2波長板）703を透過して、基本波のみの偏光方向が90度回転する。基本波及び2倍波はレンズ704を介してLBO結晶よりなる第2の非線形光学結晶705に入射し、ここでの和周波発生により3倍波が発生すると共に、2倍波の一部がそのまま透過する。

20        非線形光学結晶705から発生される2倍波と3倍波とはダイクロイック・ミラー706で分岐され、ここを透過した3倍波はレンズ707及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー708に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー706で反射された2倍波は、ミラーM1及びレンズ709を通してSBO結晶よりなる第3の非線形光学結晶710に入射し、2次高調波発生により4倍波に変換される。この4倍波は、  
25        レンズ711を経てダイクロイック・ミラー708に入射し、ダイクロ

イック・ミラー 708 で同軸に合成された 3 倍波及び 4 倍波は、S B B  
O 結晶よりなる第 4 の非線形光学結晶 712 に入射し、ここでの和周波  
発生により 7 倍波（波長 157 nm）に変換される。この 7 倍波は紫外  
のレーザ光 L B 5 として射出される。即ち、この構成例では、基本波  
5 （波長 1.099  $\mu$ m） $\rightarrow$  2 倍波（波長 549.5 nm） $\rightarrow$  3 倍波（波  
長 366.3 nm） $\rightarrow$  4 倍波（波長 274.8 nm） $\rightarrow$  7 倍波（波長 1  
57 nm）の順に波長変換される。

なお、波長変換部 20 $\sim$ 20C 以外にも非線形光学結晶を種々に組み  
合わせることにによって、8 倍波、10 倍波、又は 7 倍波を得ることがで  
10 きる。これらの中から変換効率が高く、構成が簡素化できるものを使用  
することが望ましい。

また、上記の実施の形態では、図 1（a）より分かるように m 組の n  
個の光増幅ユニット 18-1 $\sim$ 18-n の出力の合成光を一つの波長変  
換部 20 で波長変換している。しかしながら、その代わりに、例えば m  
15 ' 個（m' は 2 以上の整数）の波長変換部を用意し、m 組の光増幅ユニ  
ット 18-1 $\sim$ 18-n の出力を n' 個ずつ m' 個のグループに分けて  
（ $n \cdot m = n' \cdot m'$ ）、各グループ毎に 1 つの波長変換部で波長変換  
を行い、得られた m' 個（本例では例えば  $m' = 4$  又は 5 等）の紫外光  
を合成するようにしてもよい。即ち、波長変換部 20 は上記構成に限ら  
20 れるものではなく任意でよいし、非線形光学結晶として上記以外、例え  
ば C B O 結晶（ $\text{CsB}_3\text{O}_5$ ）、四ほう酸リチウム（ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ）、  
K A B（ $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ）、又は G d Y C O B（ $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ca}$   
4  $\text{O}(\text{BO}_3)_3$ ）などを用いてもよい。

上記の実施の形態の紫外光発生装置によれば、図 1（a）の光ファイ  
25 バー・バンドル 19 の出力端の直径が全チャネルを合わせても 2 mm 程  
度以下であるため、1 個、又は数個の波長変換部 20 ですべてのチャネ



ルの波長変換を行うことが可能である。しかも、出力端が柔軟な光ファイバーを使用しているため、波長変換部、単一波長発振レーザ、及びスプリッタ等の構成部を分けて配置することが可能となるなど、配置の自由度が極めて高い。従って、本例の紫外光発生装置によれば、安価でコンパクト、かつ単一波長でありながら空間的コヒーレンスの低い紫外レーザ装置が提供できる。

また、上記の実施の形態では、図 1 (a) の光変調素子 12 において、図 6 に示すように紫外光（レーザ光 LB5）をオフにする期間でも所定のレベルの連続光を出力しているため、後段の光ファイバー増幅器 13, 22, 25 において光サージの発生が防止されて、紫外光をオンにした直後にも目標値通りの出力を得ることができる。なお、そのように紫外光がオフの期間に連続光を出力する代わりに、紫外光がオンの期間に比べてデューティ比（パルス周期に対するハイレベル“1”の期間の割合）が 10 倍以上で望ましくは 100 倍以上のパルス光を出力してもよい。この場合にも、紫外光がオンの期間とオフの期間とで平均レベルをほぼ同じにすることによって、オフの期間のパルス光のピークレベルが  $1/10$  以下、又は  $1/100$  以下となるため、連続光を出力する場合と同様に光サージを抑えて、かつオフの期間での紫外光への変換効率をほぼ 0 にすることができる。

次に、本発明の第 2 の実施の形態につき図 7～図 9 を参照して説明する。本例は図 1 (a) の実施の形態に対して単一波長発振レーザ 11 から光ファイバー増幅器 13 までの構成が異なるため、その部分につき説明する。

図 7 は、本例の要部を示し、この図 7 において、単一波長発振レーザ 11 から出力された波長  $1.544\ \mu\text{m}$ （これを  $\lambda_1$  とする）のレーザ光 LB1 は、光ファイバー 53A を介して波長分割多重（Wavelength D

ivision Multiplexing) 素子 (WDM素子) 52に入射し、補助光源としての半導体レーザ51から射出された波長 $\lambda_1$ とは異なる波長 $\lambda_2$ のレーザ光LB Rは、光ファイバー53 Bを介してWDM素子52に入射し、WDM素子52でカップリングされたレーザ光は光ファイバー53 Cを介して光変調素子12に入射する。そして、光変調素子12でパルス変調、又は振幅変調 (レベル変調) を受けて出力されたレーザ光LB 2が光ファイバー増幅器13に入射している。

その補助光源からのレーザ光LB Rの波長 $\lambda_2$ は、光ファイバー増幅器13、及び後段の光増幅ユニット18-1~18-n中の光ファイバー増幅器22, 25で増幅可能な波長域中で、かつ波長変換部20において紫外光への変換効率がほぼ0となる波長に設定されている。紫外光としてArFエキシマレーザ光 (波長193 nm) とほぼ同一波長の光を発生する場合を想定すると、光ファイバー増幅器13, 22, 25で増幅可能な波長域は約1.53~1.56  $\mu\text{m}$ 程度であるため、レーザ光LB Rの波長 $\lambda_2$ は、例えば約1.53  $\mu\text{m}$ 又は1.56  $\mu\text{m}$ 程度に設定される。

そして、本例では第1の使用方法として、図8 (a), (b) に示すように、紫外光を出力しないオフ (OFF) の期間にはレーザ光LB 1を消灯して、レーザ光LB Rを連続発光させ、紫外光を出力するオン (ON) の期間にはレーザ光LB 1を連続発光させてレーザ光LB Rを消灯する。即ち、本来のレーザ光LB 1と補助用のレーザ光LB Rとを逆位相で発光させる。これと共に、ドライバ3から光変調素子12に供給される駆動信号としての印加電圧V12を、図8 (c) に示すように紫外光を出力するオンの期間のみにパルス状に設定する。これによって、光変調素子12から出力されるレーザ光LB 2は、図8 (d) に示すように、オンの期間には周波数100 kHz程度のピークレベルLBで幅

1 n s 程度のパルス列（波長 $\lambda_1$ ）となり、オフの期間にはレベルL Aの連続光（波長 $\lambda_2$ ）となる。この場合のレベルL Aは、例えば最終段の光ファイバー増幅器25から出力されるレーザ光の平均出力が、オンの期間とオフの期間とでほぼ等しくなるように設定されている。これによって、光ファイバー増幅器25等で光サージが生じないと共に、紫外光を出力しないオフの期間の変換効率は殆ど0となって不要なレーザ光が出力されることも無い。

また、本例では第2の使用方法として、図9（a）,（b）に示すように、本来のレーザ光L B 1と補助用のレーザ光L B Rとを逆位相で発光させると共に、ドライバ3から光変調素子12に供給される印加電圧V 1 2（駆動信号）を、図9（c）に示すように常時パルス状に設定する。これによって、光変調素子12から出力されるレーザ光L B 2は、図9（d）に示すように、オンの期間には図8（d）の場合と同様のパルス列（波長 $\lambda_1$ ）となり、オフの期間にも同様のパルス列（波長 $\lambda_2$ ）となる。これによっても、光ファイバー増幅器25等で光サージが生じないと共に、オフの期間に不要なレーザ光が出力されることも無い。

図8及び図9の制御方式の何れを使用するかは、光変調素子12の波長特性及び補助用のレーザ光L B Rの波長 $\lambda_2$ に応じて選択することが望ましい。即ち、紫外光を出力しない期間（オフの期間）で、光変調素子12から波長 $\lambda_2$ の光のみが出力されるような制御方式を選ぶことが望ましい。

なお、図7の実施の形態では、光変調素子12の入力部にWDM素子52を配置しているが、図11に示すように、光変調素子12の出力部にWDM素子52を配置して、光変調素子12からの波長 $\lambda_1$ のレーザ光L B Mと補助用の半導体レーザ51からの波長 $\lambda_2$ のレーザ光L B RとをWDM素子52でカップリングして、得られたレーザ光L B 2を光

ファイバー増幅器 13 に供給するようにしてもよい。図 11 の構成例においても、単一波長発振レーザ 11 からのレーザ光 LB1 とレーザ光 LB2 とを逆位相で発光させることによって、光ファイバー増幅器における光サージの発生を抑制して、不要な紫外光の発生を防止できる。

5 次、本発明の第 3 の実施の形態につき図 10 を参照して説明する。本例も図 1 (a) の実施の形態に対して単一波長発振レーザ 11 から光ファイバー増幅器 13 までの構成が異なるため、その部分につき説明する。

図 10 は本例の要部を示し、この図 10 において、単一波長発振レーザ 11 から出力された波長  $1.544 \mu\text{m}$  のレーザ光 LB1 (これを直線偏光とする) は、異なる偏光状態の 2 つの光を同軸に合成するための偏波合成素子 55 に入射し、補助光源としての半導体レーザ 54 から射出されたレーザ光 LB1 とは直交する方向に直線偏光した波長  $1.544 \mu\text{m}$  のレーザ光 LB2 は偏波合成素子 55 に入射し、偏波合成素子 55 でカップリングされたレーザ光は光変調素子 12 に入射する。そして、光変調素子 12 でパルス変調、又は振幅変調 (レベル変調) を受けて出力されたレーザ光 LB3 が光ファイバー増幅器 13 に入射している。

この場合、本例で使用されている各光ファイバーにおいては、内部を伝播する光の偏光状態は或る程度保存されるものとし、最終的に図 1 (a) の光ファイバー・バンドル 19 から射出されるレーザ光 LB4 は、波長変換部 20 から紫外光が出力される期間 (オンの期間) において最大の変換効率が得られる偏光状態となるように、各光ファイバーの角度等が設定されているものとする。そして、図 10 において、レーザ光 LB1 の偏光方向は波長変換部 20 において最大の変換効率が得られる方向に設定されており、補助光源からのレーザ光 LB2 の偏光方向は、波長変換部 20 において変換効率が最小になる方向となっている。

この実施の形態においても、図 7 の実施の形態と同様に、レーザ光 L B 1 とレーザ光 L B P とは紫外光を出力する期間（オンの期間）と出力しない期間（オフの期間）とで逆位相で発光する。また、光変調素子 1 2 の駆動方法にも、図 8 に示すようにオンの期間のみにパルス光を出力させる方法と、図 9 に示すように常時パルス光を出力させる方法とがある。図 8 及び図 9 の制御方式の何れを使用するかは、光変調素子 1 2 の波長特性及び補助用のレーザ光 L B P の偏光状態に応じて選択することが望ましい。即ち、紫外光を出力しない期間（オフの期間）で、光変調素子 1 2 からレーザ光 L B P のみが出力されるような制御方式を選ぶことが望ましい。これによって、光ファイバー増幅器 1 3, 2 2, 2 5 では常時ほぼ一定の出力が得られて光サージの発生が抑制されていると共に、オフの期間には波長変換部 2 0 で紫外光に対する変換効率がほぼ 0 になって、不要な紫外光が出力されることが無い。

なお、図 1 0 の実施の形態では、光変調素子 1 2 の入力部に偏波合成素子 5 5 を配置しているが、図 1 2 に示すように、光変調素子 1 2 の出力部に偏波合成素子 5 5 を配置して、光変調素子 1 2 からの直線偏光のレーザ光 L B M と補助用の半導体レーザ 5 4 からの偏光方向が直交するレーザ光 L B P とを偏波合成素子 5 5 でカップリングして、得られたレーザ光 L B 2 を光ファイバー増幅器 1 3 に供給するようにしてもよい。図 1 2 の構成例においても、単一波長発振レーザ 1 1 からのレーザ光 L B 1 とレーザ光 L B P とを逆位相で発光させることによって、光ファイバー増幅器における光サージの発生を抑制して、不要な紫外光の発生を防止できる。

次に、図 1 (a) の紫外光発生装置を用いた露光装置の一例につき説明する。図 1 3 は、本例の露光装置を示し、この図 1 3 において、露光光源 1 7 1 としては、図 1 (a) の紫外光発生装置中の単一波長発振レ

ーザ 1 1 から m 組の光増幅ユニット 1 8 - 1 ~ 1 8 - n までの部分が使用される。また、その紫外光発生装置は、最終的に出力されるレーザ光 L B 5 の波長が 1 9 3 nm、1 5 7 nm、又はそれ以外の紫外域にできるように調整されている。

5 図 1 3 の露光光源 1 7 1 から射出されたレーザ光（基本波）の大部分は、接続用光ファイバー 1 7 3、及び波長選択部 1 7 2 を介して露光光として照明系 1 6 2 に供給され、そのレーザ光の残りの部分は接続用光ファイバー 1 7 8 を介してアライメント系（詳細後述）に供給される。光ファイバー 1 7 3 及び 1 7 8 はそれぞれ図 1（a）の光ファイバー・  
10 バンドル 1 9 を分岐したものに対応している。

波長選択部 1 7 2 は、露光光源 1 7 1 からの基本波を波長変換してレーザ光 L B 5 よりなる紫外域の露光光を出力する波長変換部（図 1（a）の波長変換部 2 0 に対応する）であり、照明系 1 6 2 は、その露光光の照度分布を均一化するオプティカル・インテグレータ（ホモジナイザー）、開口絞り、リレーレンズ、視野絞り（レチクルブラインド）、及び  
15 コンデンサレンズ等から構成され、露光時には照明系 1 6 2 から射出された露光光が、マスクとしてのレチクル 1 6 3 のパターン面のスリット状の照明領域を均一な照度分布で照明する。この際に本例の露光光は空間コヒーレンスが低いため、照明系 1 6 2 中の空間コヒーレンスを低下させるための部材の構成を簡素化でき、露光装置を更に小型化できる。  
20

レチクル 1 6 3 はレチクルステージ 1 6 4 上に載置されており、レチクル 1 6 3 を透過した露光光は投影光学系 1 6 5 を介して、被露光基板としてのウエハ（wafer）1 6 6 上に照明領域の内のパターンの縮小像を倍率  $M_{RW}$ （例えば  $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$  等）で投影する。投影光学系  
25 1 6 5 としては、屈折系、反射系、又は反射屈折系が使用できる。但し、露光光が波長 2 0 0 nm 程度以下の真空紫外光である場合には高透過率

の材料が限定されるため、投影光学系を小型化して、かつ結像性能を高めるために反射屈折系を使用してもよい。ウエハ166にはフォトリソが塗布されており、ウエハ166は、例えば半導体（シリコン等）又はSOI (silicon on insulator)等の円板状の基板である。

5       ウエハ166は、ウエハステージ167上に保持され、ウエハ166の3次元的な位置は駆動部169によって駆動されるウエハステージ167によって設定される。また、レチクルステージ164は駆動機構168によって2次元平面内での変位、及び回転が可能な状態で駆動され、  
10       駆動部169及び駆動機構168の動作は主制御系177によって制御されている。そして、露光時には、ウエハステージ167のステップ移動によってウエハ166の位置決めを行った後、照明領域に対してレチクルステージ164を介してレチクル163を所定方向に走査し、ウエハ166をウエハステージ167を介して倍率 $M_{RW}$ を速度比として走査するというステップ・アンド・スキャン方式で、ウエハ166上の各シ  
15       ョット領域にレチクル163のパターンの像が転写される。このように本例の露光装置は走査露光型であるが、露光光源171はステッパ等の一括露光型の露光装置にも適用できることは明らかである。

この場合、本例の露光光源171及び波長選択部172（光源系）は小型であるため、照明系162を支持する架台にその光源系の少なくとも一部（例えば波長選択部172など）と一緒に固定しても良い。ある  
20       いは露光光源171を単独で架台に固定しても良い。但し、露光光源171に接続される電源などは別置きにしておくことが好ましい。

以上のように、本例の紫外光発生装置を用いた露光装置は従来の他の方式（エキシマレーザやアレイレーザを用いた露光装置）にくらべて小  
25       型であり、また、各要素が光ファイバーで接続されて構成されているため、装置を構成する各ユニットの配置の自由度が高い利点がある。

ところで、前述の走査露光時における露光量制御では、図 1 (a) の  
光変調素子 12 によって規定されるパルス繰り返し周波数  $f$  と、遅延素  
子（光ファイバー 15-1 ~ 15-m, 17-1 ~ 17-n）によって  
規定されるチャネル間の遅延時間との少なくとも一方を調整して、走査  
5 露光中に露光光源 171 から複数のパルス光を等時間間隔で発振させる  
ようにしてもよい。更に、フォトリジストの感度特性に応じて、ウエハ  
166 上でのパルス光の強度、ウエハ 166 の走査速度、パルス光の発  
振間隔（周波数）、及びウエハ 166 の走査方向に関するパルス光（即  
ちその照射領域）の幅の少なくとも 1 つを調整し、ウエハ上の各点が照  
10 射領域を横切る間に照射される複数のパルス光の積算光量を適正露光量  
に制御する。このとき、スループットを考慮して、ウエハ 166 の走査  
速度がウエハステージ 167 の最高速度にほぼ維持されるように、他の  
制御パラメータ、即ちパルス光の強度、発振周波数、及び照射領域の幅  
の少なくとも 1 つを調整することが好ましい。

15 また、本例においては、接続用光ファイバー 173, 178 が使用さ  
れているため、露光光源 171 を露光装置本体の外部に設けることも可  
能である。このような構成とすることにより、光ファイバー増幅器の励  
起用半導体レーザや半導体レーザのドライブ用電源、温度コントローラ  
等の発熱を伴う主要な構成部分を露光機本体の外に配設することができ  
20 る。従って、露光装置本体が露光光源である紫外光発生装置からの発熱  
の影響を受けて光軸のアライメントがずれる等の熱に起因する問題を抑  
制することができる。

また、本例のレチクルステージ 164 は駆動機構 168 によって X 方  
向、Y 方向に移動可能で、かつ微小回転可能に構成されている。更に、  
25 ウエハステージ 167 上には基準マーク板 FM が設けられており、この  
基準マーク板 FM は後述するベースライン計測などに用いられる。更に



本例では、レチクル 1 6 3 上のアライメントマークを検出するアライメント系 1 8 0 と、投影光学系 1 6 5 を介さないオフ・アクシス方式のアライメント系 1 8 1 とが設けられている。

本例では露光光源 1 7 1 からのレーザ光（基本波）の一部を分岐して光ファイバー 1 7 8 を介してアライメント系 1 8 0 用の波長変換部 1 7 9 に供給している。波長変換部 1 7 9 としては、図 1（a）の波長変換部 2 0 と同様で、かつ小型の波長変換部を使用する。波長変換部 1 7 9 はアライメント系 1 8 0 を保持する架台に一体に設けておき、波長変換部 1 7 9 から射出される露光光と同じ波長のレーザ光 L B 5 をアライメント系 1 8 0 の照明光 A L として使用する。

これにより、アライメント系 1 8 0 の光源を別途用意する必要がなくなると共に、露光光と同一波長の照明光を用いて基準マーク又はアライメントマークを検出でき、高精度なマーク検出が可能となる。即ち、アライメント系 1 8 0 は、露光光と同一波長域の照明光 A L をレチクル 1 6 3 上のアライメントマーク、及び投影光学系 1 6 5 を通して基準マーク板 F M 上の基準マークに照射すると共に、両マークから発生する光を撮像素子（C C D）で受光してその位置ずれを検出するものであり、レチクル 1 6 3 のアライメントやアライメント系 1 8 1 のベースライン計測などに用いられる。

オフ・アクシス方式のアライメント系 1 8 1 は、例えば 5 5 0 ～ 7 5 0 n m 程度の波長幅を持つ白色光（ブロードバンド光）をウエハ 1 6 6 上のアライメントマークに照射すると共に、その内部に設けられる指標マークの像とアライメントマークの像とを撮像素子（C C D）上に結像させて両マークの位置ずれを検出するものである。

この場合、アライメント系 1 8 0、1 8 1 でそれぞれ基準マーク板 F M 上の基準マークを検出することで、その検出結果からアライメント系

1 8 1 のベースライン量（検出中心と露光中心との間隔）を計測することができ、この結果及びアライメント系 1 8 1 の計測結果に基づいてウエハ 1 6 6 上の各ショット領域のアライメントが高精度に行われる。なお、ベースライン計測はウエハの露光開始前に行われるが、ウエハを交換するたびにベースライン計測を行ってもよいし、あるいは複数枚のウエハの露光動作に 1 回程度の割合でベースライン計測を行うようにしてもよい。但し、レチクル交換後には必ずベースライン計測が行われる。

5      なお、前述した実施形態で用いる光ファイバー（光ファイバー増幅器などを含む）はその表面を脱ガスが少ないテフロン、又はフッ素系樹脂などで被覆しておくことが好ましい。これは、光ファイバーから発生する異物（繊維などを含む）が露光装置を汚染する物質となり得るため、そのような汚染物質の発生を防止するためである。但し、テフロンなどで被覆する代わりに、チャンバー内に配置される光ファイバーをまとめてステンレス製の筐体に収納するようにしてもよい。

15      また、上記の実施の形態の図 1 3 の露光装置ではレチクル 1 6 3 上のマークあるいはレチクルステージ 1 6 4 に設けられる基準マークを露光光と同一波長の照明光で照明し、投影光学系 1 6 5 によって形成されるマーク像をウエハステージ 1 6 7 に設けられる開口（スリットなど）を介して検出する空間像計測系を設けるようにしてもよい。この場合、その空間像計測系用の照明光を発生する光源として、前述の光源（1 7 1 , 20      1 7 9）と同一構成の光源を別途用意してもよいし、露光光源 1 7 1 ～照明系 1 6 2 よりなる露光用光源を兼用してもよい。

25      また、上記の実施の形態の投影露光装置は、複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系を露光装置本体に組み込み光学調整をすると共に、多数の機械部品からなるレチクルステージやウエハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、更に総合調整（電気調

整、動作確認等) をすることにより製造することができる。なお、露光装置の製造は温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

また、半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、  
5 このステップに基づいたレチクルを製造するステップ、シリコン材料からウエハを制作するステップ、前述した実施の形態の露光装置によりレチクルのパターンをウエハに露光するステップ、デバイス組み立てステップ（ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む）、検査ステップ等を経て製造される。

10 更に、本発明は液晶表示素子やプラズマディスプレイ素子等の表示素子、薄膜磁気ディスク、マイクロマシーン、及びDNAチップ等の各種デバイスを製造する際にも適用することができる。また、投影露光装置用のフォトマスクを製造する際にも本発明を適用することができる。

15 なお、本発明の露光装置中のレーザ装置は、例えばウエハ上に形成された回路パターンの一部（ヒューズなど）を切断するために用いられるレーザリペア装置などにも用いることができる。また、本発明によるレーザ装置は可視光または赤外光を用いる検査装置などにも適用することができる。そしてこの場合には前述の波長変換部をレーザ装置に組み込む必要がない。即ち、本発明は紫外光発生装置だけでなく、可視域また  
20 は赤外域の基本波を発生する、波長変換部がないレーザ装置に対しても有効なものである。

25 なお、前述の実施形態では図1のレーザ装置を露光装置の露光用光源、あるいはアライメント系又は空間像計測系の光源として用いるものとしたが、これら以外のマーク検出系や光学系などの調整用光源などとして用いてもよいし、デバイス製造工程で用いられる露光装置や検査装置などだけでなく、用途などに関係なく各種装置（一例として従来はエキシ

マレーザを光源としていたもの、例えば角膜の曲率や凹凸を矯正して近眼、乱視などの治療を行うレーザ治療装置など）の光源として用いてもよい。

5      なお、本実施の形態の露光装置として、投影光学系を用いることなくマスクと基板とを密接させてマスクのパターンを露光するプロキシミティ露光装置にも適用することができる。

10      なお、本発明は上述の実施の形態に限定されることなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得ることは勿論である。また、明細書、特許請求の範囲、図面、及び要約を含む1999年9月10日付け提出の日本国特許出願第11-258132号の全ての開示内容は、

そっくりそのまま引用して本願に組み込まれている。

#### 産業上の利用の可能性

15      本発明によれば、光ファイバー増幅器を用いているため、小型化で、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を備えた露光装置を提供することができる。

20      また、紫外光を出力する期間中は前記レーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調して前記光増幅部に供給し、前記紫外光を出力しない期間中にも前記紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲で前記光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給しているため、最終的にレーザ光（紫外光）の出力を開始する際の光サージの影響が軽減されて、常に目標とする出力が得られる。

25      更に、レーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐部を更に備え、光増幅部をその複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けると共に、波長変換部は、その複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束をまとめて波長変換することによって、出力光の発振周

波数を高くして、かつ空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭くできる。

5

10

15

20

25

## 請 求 の 範 囲

1. レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置であって、

5 前記レーザ装置は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されるレーザ光の変調を行う光変調部と、

10 該光変調部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部とを備え、

15 前記光変調部は、前記紫外光を出力する期間中は前記レーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調して前記光増幅部に供給し、前記紫外光を出力しない期間中にも前記紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲で前記光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給することを特徴とする露光装置。

2. 請求の範囲1に記載の露光装置であって、

20 前記光変調部は、前記紫外光を出力する期間中は前記レーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調して前記光増幅部に供給し、前記紫外光を出力しない期間中には、前記レーザ光発生部からのレーザ光のピークレベルを低下させて前記光増幅部に供給することを特徴とする露光装置。

3. 請求の範囲2に記載の露光装置であって、

25 前記紫外光を出力する期間中に前記光変調部から前記光増幅部に供給されるレーザ光のピークレベルに対して、前記紫外光を出力しない期間中に前記光変調部から前記光増幅部に供給されるレーザ光のピークレベ

ルは 1 / 1 0 以下であると共に、

前記紫外光を出力する期間中に前記光増幅部から出力される光の平均レベルと、前記紫外光を出力しない期間中に前記光増幅部から出力される光の平均レベルとは実質的に等しいことを特徴とする露光装置。

5 4. 請求の範囲 3 に記載の露光装置であって、

前記光変調部は、前記紫外光を出力しない期間中、前記光増幅部に連続光を供給することを特徴とする露光装置。

5. 請求の範囲 1 に記載の露光装置であって、

10 前記光変調部は、前記レーザ光発生部から発生するレーザ光とは波長の異なる補助光を発生する補助光源を備え、

前記光変調部は、前記紫外光を出力する期間中は前記レーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調して前記光増幅部に供給し、前記紫外光を出力しない期間中には前記補助光を前記光増幅部に供給することを特徴とする露光装置。

15 6. 請求の範囲 5 に記載の露光装置であって、

前記補助光の波長域は前記光増幅部の利得幅内で、かつ前記波長変換部で紫外光に変換できる波長範囲外にあると共に、

20 前記光変調部は、前記補助光と前記レーザ光発生部からのレーザ光とを合成する波長分割多重部材と、該波長分割多重部材で合成された光を変調する変調装置とを更に有することを特徴とする露光装置。

7. 請求の範囲 5 に記載の露光装置であって、

前記補助光の波長域は前記光増幅部の利得幅内で、かつ前記波長変換部で紫外光に変換できる波長範囲外にあると共に、

25 前記光変調部は、前記レーザ光発生部からのレーザ光を変調する変調装置と、該変調装置から出力される光と前記補助光とを合成する波長分割多重部材とを更に有することを特徴とする露光装置。

8. 請求の範囲 1 に記載の露光装置であって、

前記光変調部は、前記レーザ光発生部から発生するレーザ光とは偏光状態の異なる補助光を発生する補助光源を備え、

5 前記光変調部は、前記紫外光を出力する期間中は前記レーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調して前記光増幅部に供給し、前記紫外光を出力しない期間中には前記補助光を前記光増幅部に供給することを特徴とする露光装置。

9. 請求の範囲 8 に記載の露光装置であって、

10 前記補助光の偏光状態は、前記波長変換部で紫外光に変換できる偏光状態には無いと共に、

前記光変調部は、前記補助光と前記レーザ光発生部からのレーザ光とを合成する偏波合成部材と、該偏波合成部材で合成された光を変調する変調装置とを更に有することを特徴とする露光装置。

10. 請求の範囲 8 に記載の露光装置であって、

15 前記補助光の偏光状態は、前記波長変換部で紫外光に変換できる偏光状態には無いと共に、

前記光変調部は、前記レーザ光発生部からのレーザ光を変調する変調装置と、該変調装置から出力される光と前記補助光とを合成する偏波合成部材とを更に有することを特徴とする露光装置。

20 11. レーザ装置からの紫外光で第 1 物体を照明し、該第 1 物体のパターンを経た紫外光で第 2 物体を露光する装置であって、

前記レーザ装置は、単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、前記レーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、前記増幅されたレーザ光を紫外光に波長変換する波長変換部とを備え、

25 前記紫外光を出力する期間と異なる条件で前記紫外光を出力しない期間にも前記光増幅部に光を供給する光供給部を備えたことを特徴とする



露光装置。

1 2. 請求の範囲 1 ～ 1 1 の何れか一項に記載の露光装置であって、

前記レーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐部を更に備え、

5 前記光増幅部は前記複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けられると共に、

前記波長変換部は、前記複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束をまとめて波長変換することを特徴とする露光装置。

1 3. 請求の範囲 1 ～ 1 1 の何れか一項に記載の露光装置であって、

10 前記レーザ光発生部は、波長が 1 . 5  $\mu$  m 付近の単一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記光増幅部から出力される前記波長 1 . 5  $\mu$  m 付近の基本波を、8 倍高調波又は 1 0 倍高調波の紫外光に変換して出力することを特徴とする露光装置。

15 1 4. 請求の範囲 1 ～ 1 1 の何れか一項に記載の露光装置であって、

前記レーザ光発生部は、波長が 1 . 1  $\mu$  m 付近の単一波長のレーザ光を発生し、

20 前記波長変換部は、前記光増幅部から出力される前記波長 1 . 1  $\mu$  m 付近の基本波を、7 倍高調波の紫外光に変換して出力することを特徴とする露光装置。

1 5. 請求の範囲 1 ～ 1 1 の何れか一項に記載の露光装置であって、

前記レーザ装置からの紫外光を前記第 1 物体としてのマスクに照射する照明系と、前記マスクのパターンの像を前記第 2 物体としての基板上に投影する投影光学系とを有することを特徴とする露光装置。

25 1 6. 請求の範囲 1 ～ 1 1 の何れか一項記載の露光装置を用いた露光方法であって、

前記レーザ装置からの紫外光で前記第 1 物体と前記第 2 物体とのアライメントを行うことを特徴とする露光方法。

17. レーザ装置からの紫外光で第 1 物体を照明し、該第 1 物体のパターンを経た紫外光で第 2 物体を露光する露光方法であって、

5 単一波長のレーザ光を光ファイバー増幅器で増幅するとともに、該増幅されたレーザ光を前記紫外光に波長変換し、

前記紫外光を出力する期間と異なる条件で前記紫外光を出力しない期間にも前記光ファイバー増幅器に光を供給することを特徴とする露光方法。

10 18. レーザ装置からの紫外光で第 1 物体のパターンを照明し、該第 1 物体のパターンを経た紫外光で第 2 物体を露光する露光装置の製造方法であって、

前記レーザ装置を、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、該レーザ光発生部から発生されるレーザ光の変調を行う光変調部と、該光変調部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、該光増幅部によ

15 って増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部とを所定の位置関係で配置して構成し、

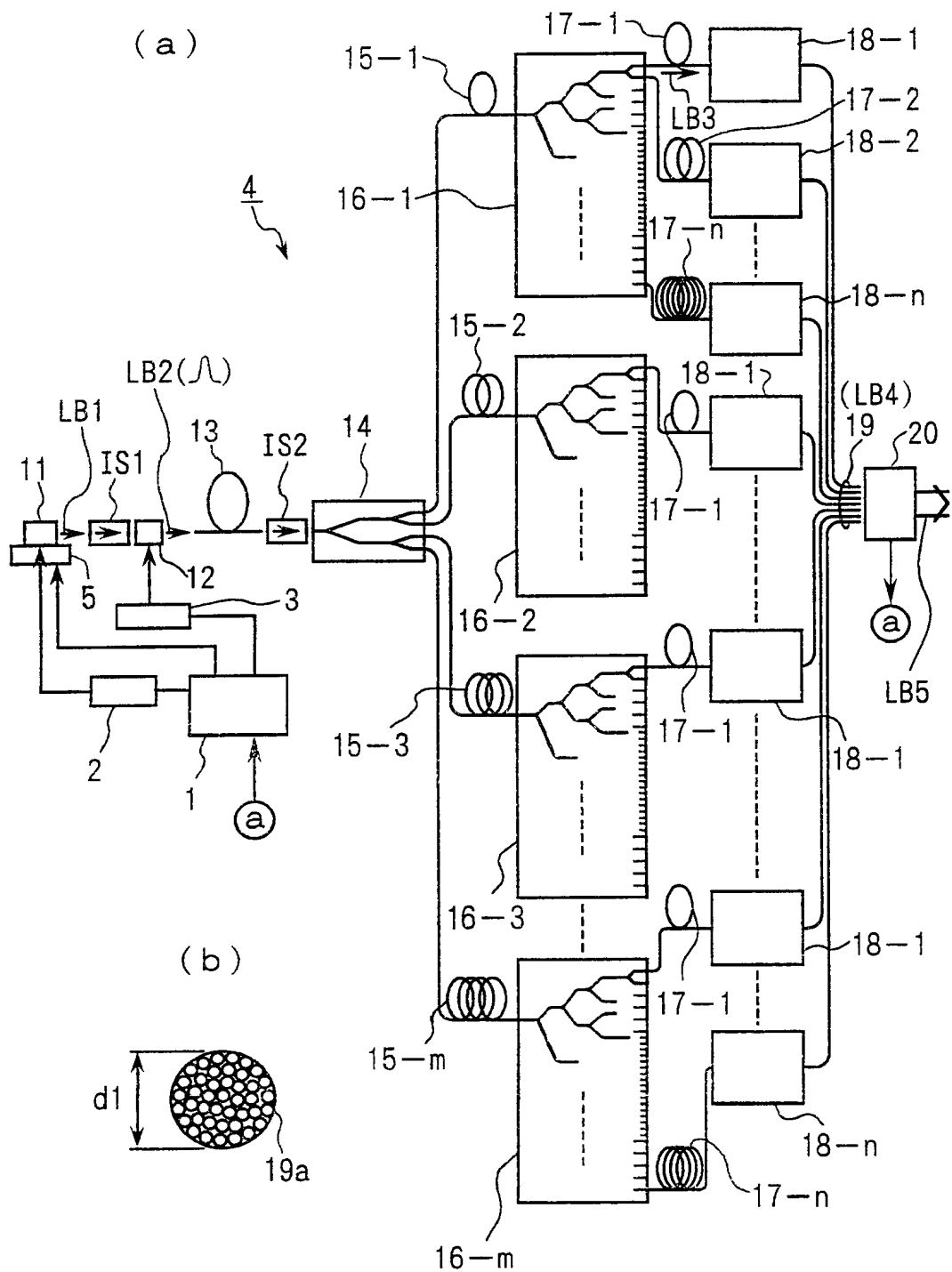
前記光変調部を、前記紫外光を出力する期間中は前記レーザ光発生部からのレーザ光をパルス変調して前記光増幅部に供給し、前記紫外光を出力しない期間中にも前記紫外光の出力に実質的に影響を与えない範囲で前記光増幅部に増幅可能な波長域の光を供給するように構成したことを特徴とする露光装置の製造方法。

20

19. 請求の範囲 1 ～ 11 の何れか一項記載の露光装置を用いてマスクパターンを基板上に転写する工程を含むデバイスの製造方法。

25

図 1



2/8

図 2

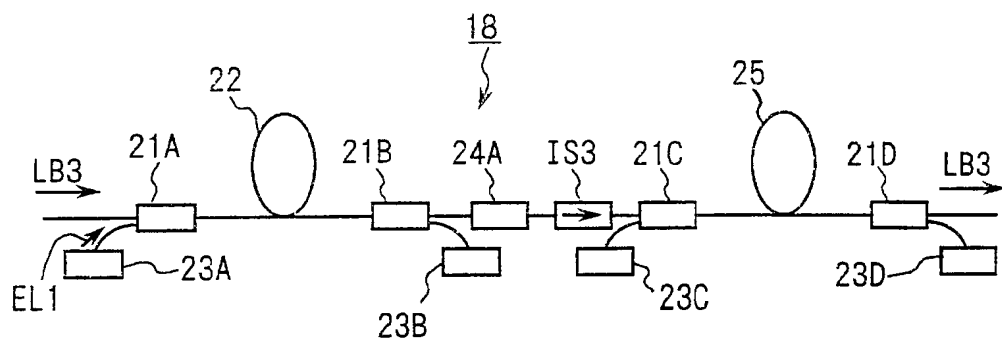
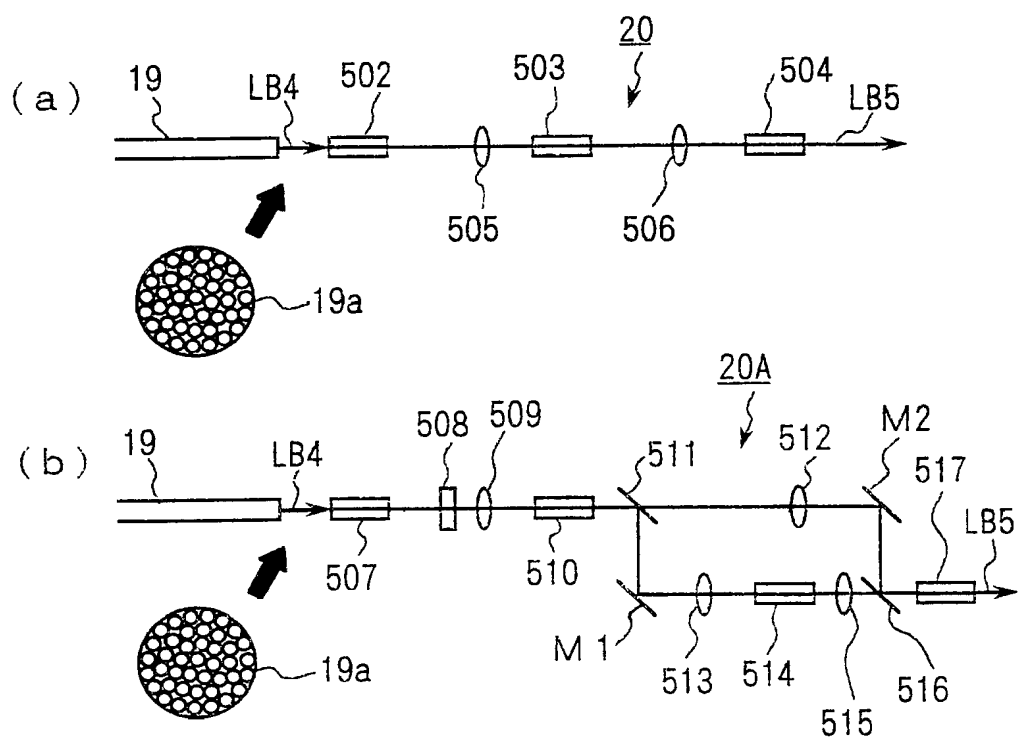


図 3



3/8

図 4

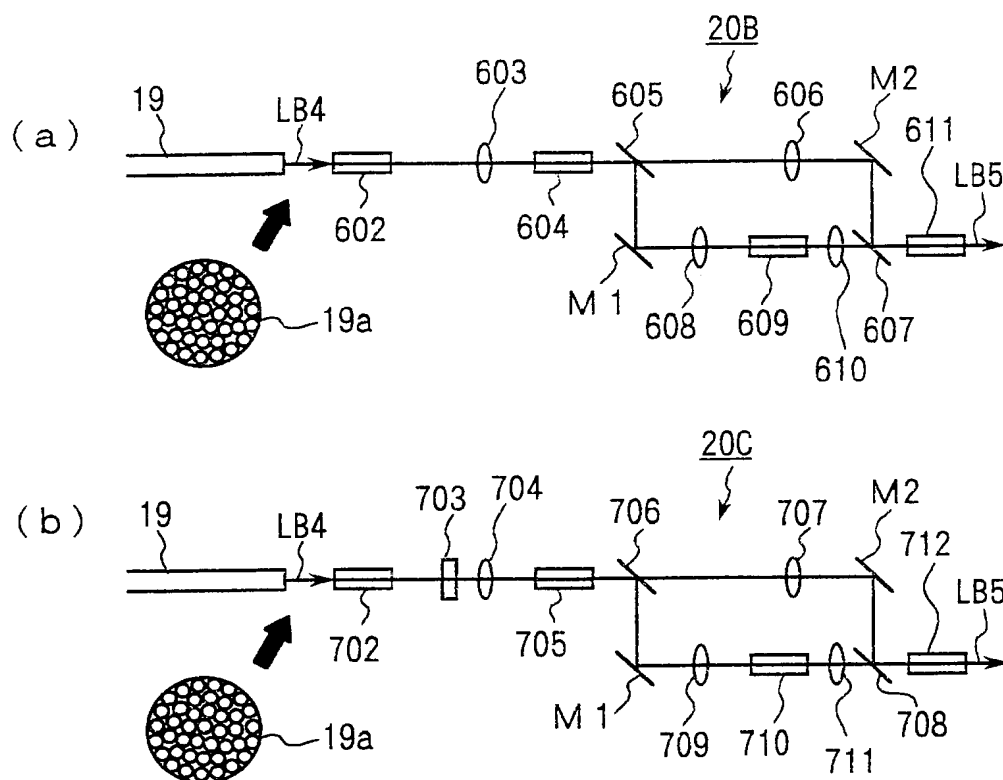


図 5

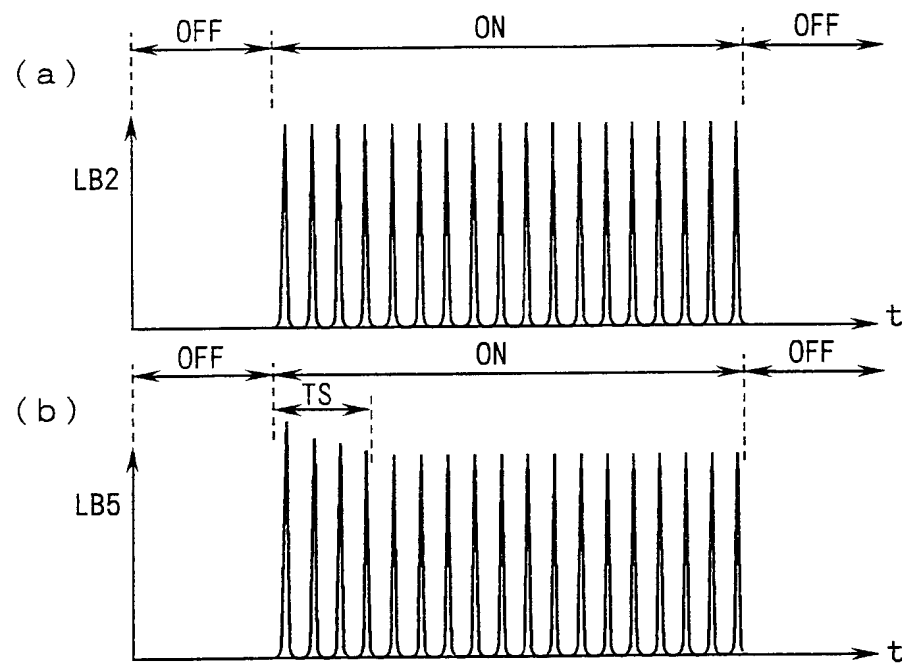
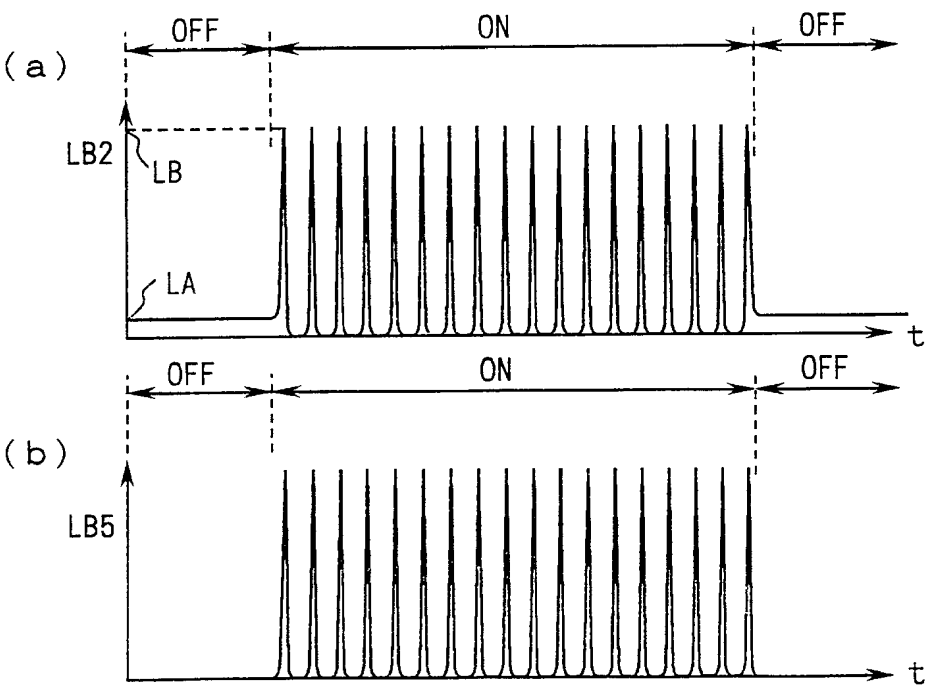


図 6



5/8

図 7

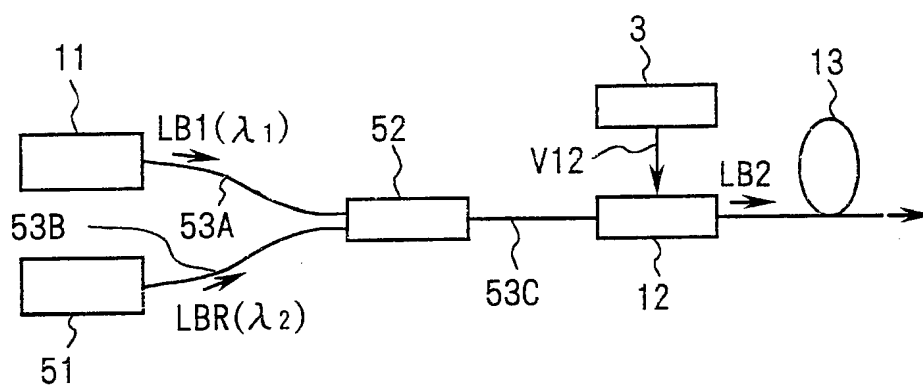
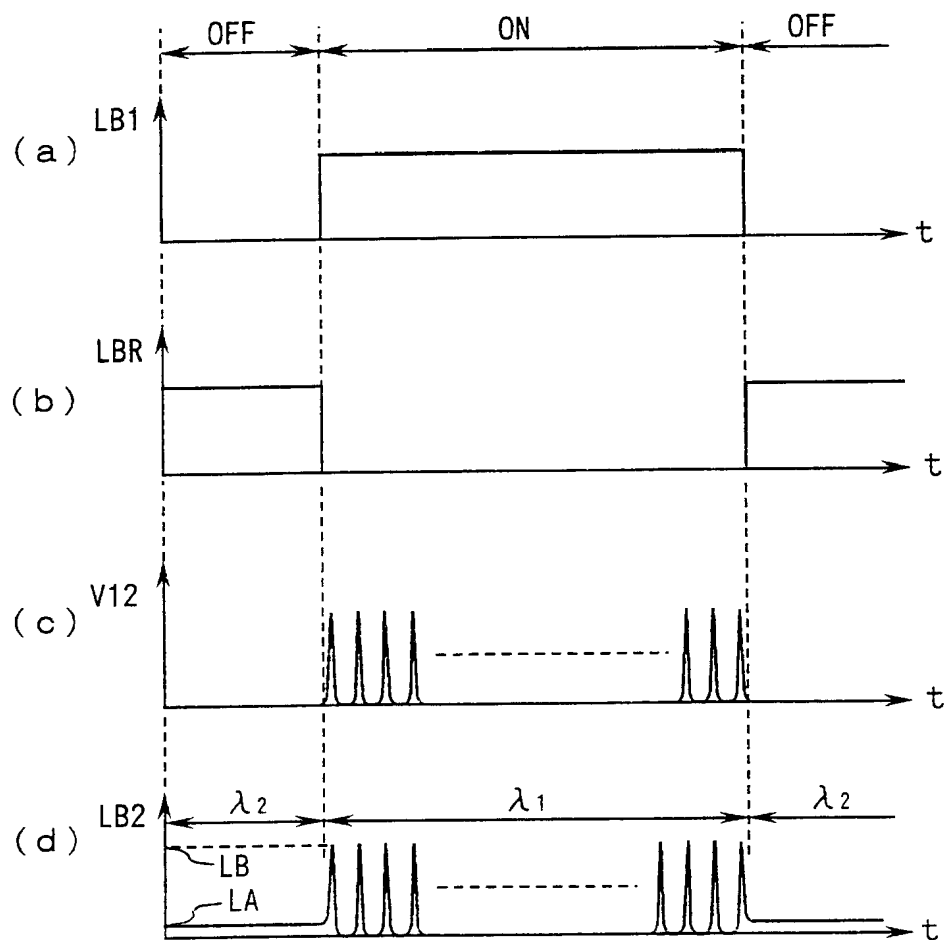


図 8



6/8

図 9

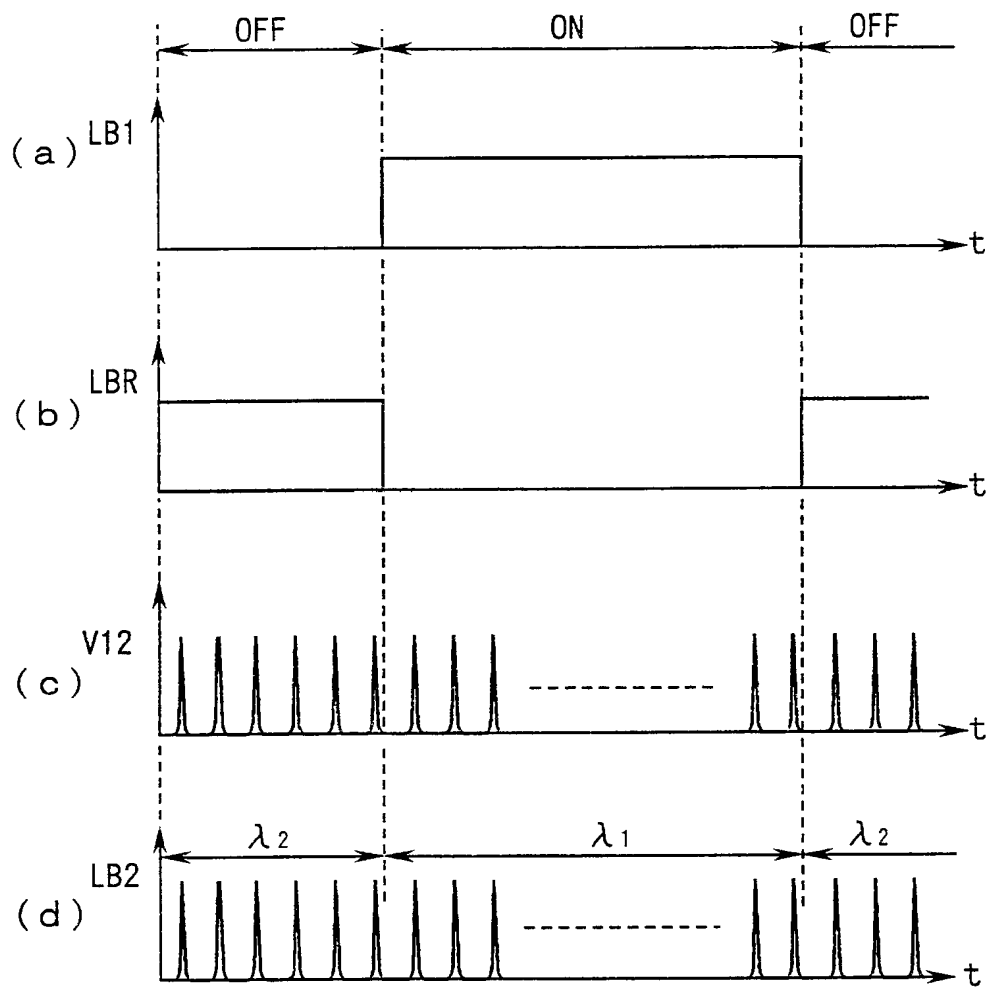




図 1 0

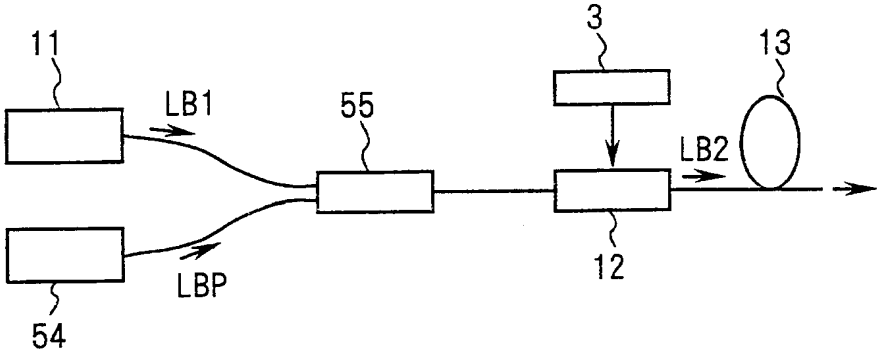


図 1 1

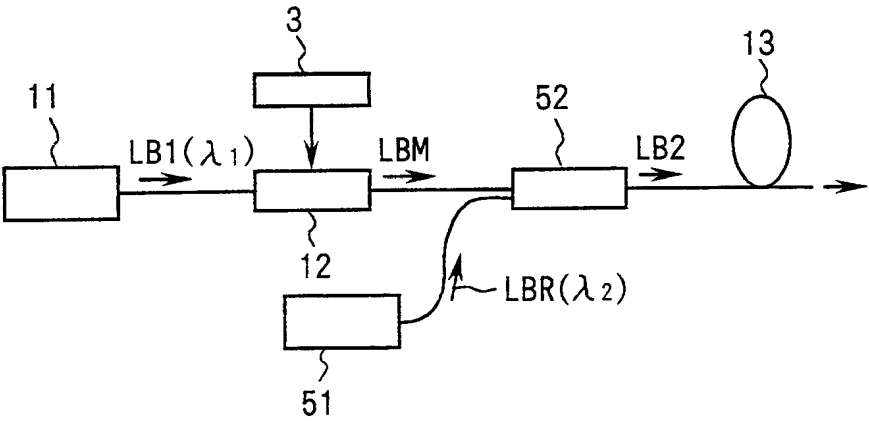
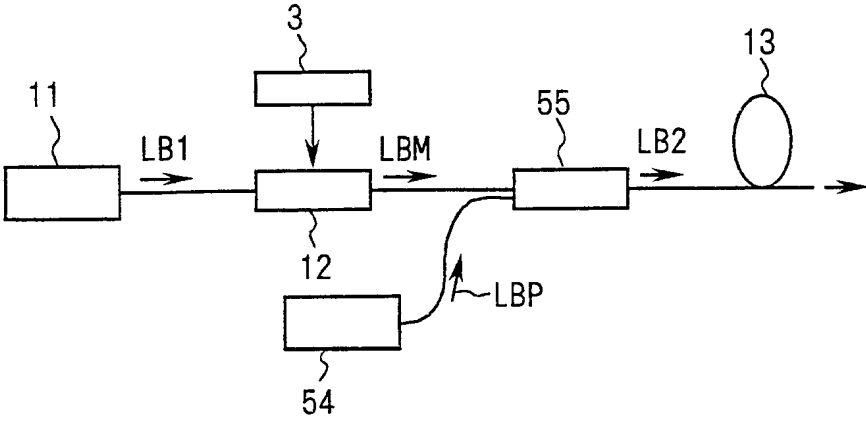
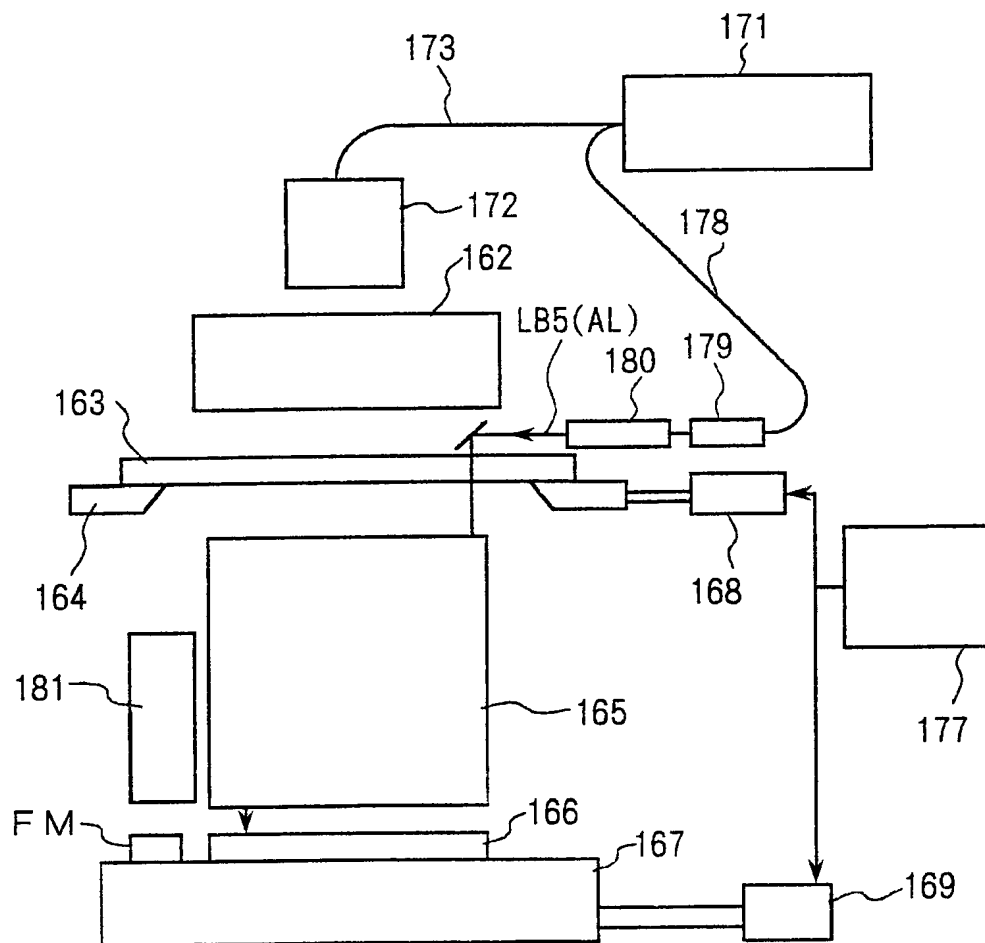


図 1 2



8/8

図 1 3



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/06132

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> G02F1/37, G03F7/20, H01L21/027, H01S3/06,  
H01S3/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> G02F1/37, G03F7/20, H01L21/027, H01S3/06,  
H01S3/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

|                           |           |                            |           |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho       | 1926-1996 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2000 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2000 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2000 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| A         | US, 5838709, A (Nikon Corporation),<br>17 November, 1998 (17.11.98),<br>Full text; all drawings<br>& JP, 8-334803, A & JP, 9-148658, A | 1-19                  |
| A         | JP, 10-135555, A (Hitachi, Ltd.),<br>22 May, 1998 (22.05.98),<br>page 1 (Family: none)   | 1-19                  |
| A         | JP, 8-97125, A (Sony Corporation),<br>12 April, 1996 (12.04.96),<br>page 1 (Family: none)  | 1-19                  |
| A         | JP, 9-114100, A (Sony Corporation),<br>02 May, 1997 (02.05.97),<br>page 1 (Family: none)   | 1-19                  |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

|   |  |
|---|--|
| * Special categories of cited documents:  | "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone   |
| "E" earlier document but published on or after the international filing date  | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "&" document member of the same patent family  |
| "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  |  |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed  |  |

Date of the actual completion of the international search  
27 November, 2000 (27.11.00)

Date of mailing of the international search report  
05 December, 2000 (05.12.00)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

|  |   |                     |
|--|---|---------------------|
| A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  |   |                     |
| Int. Cl <sup>7</sup> G02F1/37, G03F7/20, H01L21/027, H01S3/06,<br>H01S3/00   |   |                     |
| B. 調査を行った分野  |   |                     |
| 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))   |   |                     |
| Int. Cl <sup>7</sup> G02F1/37, G03F7/20, H01L21/027, H01S3/06,<br>H01S3/00   |   |                     |
| 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの   |   |                     |
| 日本国実用新案公報 1926-1996年<br>日本国公開実用新案公報 1971-2000年<br>日本国登録実用新案公報 1994-2000年<br>日本国実用新案登録公報 1996-2000年   |   |                     |
| 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  |   |                     |
| C. 関連すると認められる文献  |   |                     |
| 引用文献の<br>カテゴリー*  | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示   | 関連する<br>請求の範囲の番号    |
| A  | US, 5838709, A (Nikon Corporation)<br>17. 11月. 1998 (17. 11. 98)<br>全文、全図<br>& JP, 8-334803, A<br>& JP, 9-148658, A | 1-19                |
| A  | JP, 10-135555, A (株式会社日立製作所)<br>22. 5月. 1998 (22. 05. 98)<br>第1頁<br>(ファミリーなし)                                       | 1-19                |
| <input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。  |   |                     |
| * 引用文献のカテゴリー<br>「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの<br>「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの<br>「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)<br>「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献<br>「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献<br>「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの<br>「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの<br>「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの<br>「&」 同一パテントファミリー文献 |   |                     |
| 国際調査を完了した日   | 27. 11. 00  | 国際調査報告の発送日 05.12.00 |
| 国際調査機関の名称及びあて先<br>日本国特許庁 (ISA/JP)<br>郵便番号 100-8915<br>東京都千代田区霞が関三丁目4番3号  | 特許庁審査官 (権限のある職員)<br>岩 本 勉 印<br>電話番号 03-3581-1101 内線 3274  | 2M 9355             |

| C (続き). 関連すると認められる文献 |   |                  |
|----------------------|---|------------------|
| 引用文献の<br>カテゴリー*      | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示   | 関連する<br>請求の範囲の番号 |
| A                    | JP, 8-97125, A (ソニー株式会社)<br>12. 4月. 1996 (12. 04. 96)<br>第1頁<br>(ファミリーなし) | 1-19             |
| A                    | JP, 9-114100, A (ソニー株式会社)<br>2. 5月. 1997 (02. 05. 97)<br>第1頁<br>(ファミリーなし) | 1-19             |